



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

TEMA:

**Diseño e implementación de sistemas de control de lazo cerrado  
utilizando MatLab/Simulink**

AUTOR:

Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de  
**INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

TUTOR:

M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio

Guayaquil, Ecuador

16 de septiembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**.

TUTOR

---

M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio

DIRECTOR DE CARRERA

---

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 16 días del mes de septiembre del año 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación **Diseño e implementación de sistemas de control de lazo cerrado utilizando MatLab/Simulink**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 16 días del mes de septiembre del año 2021

EL AUTOR

---

AMAGUAYA AMAGUAYA, JAIME OSWALDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Diseño e implementación de sistemas de control de lazo cerrado utilizando MatLab/Simulink**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 16 días del mes de septiembre del año 2021

EL AUTOR

AMAGUAYA AMAGUAYA, JAIME OSWALDO

# REPORTE DE URKUND

**URKUND** Fernando Palacios Meléndez (edwin\_palacios)

<b>Documento</b>	Amaguaya_Jaime.docx (D114900812)
<b>Presentado</b>	2021-10-11 12:30 (-04:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
<b>Mensaje</b>	Revisión TT Amaguaya <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 2% de estas 20 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

**Lista de fuentes** Bloques

Categoría	Enlace/nombre de archivo
>	<a href="#">TT Chavez W.docx</a>
	<a href="#">TT-Miguel-Flores-31-08-17 SDA.doc</a>
	<a href="#">Complejivo Cesar Madrid.docx</a>
<b>Fuentes alternativas</b>	
<b>Fuentes no usadas</b>	

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERIA

ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

TEMA: Diseño e implementación de sistemas de control de lazo cerrado utilizando MatLab/Simulink

AUTOR: Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo

Trabajo de Titulación previo a

la

obtención del título de INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO

TUTOR: M. Sc. Córdova Rivadeneira,



## **DEDICATORIA**

Primero a Dios, a mis padres y familia que me han brindado su apoyo espiritual y moral.

EL AUTOR

AMAGUAYA AMAGUAYA, JAIME OSWALDO

## **AGRADECIMIENTO**

A todos los docentes de la FETD y a mis compañeros que hemos culminado los estudios de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo.

EL AUTOR

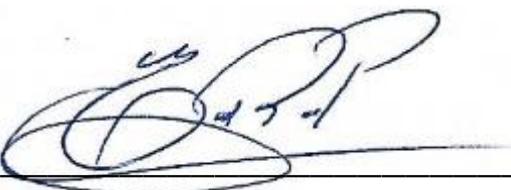
AMAGUAYA AMAGUAYA, JAIME OSWALDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

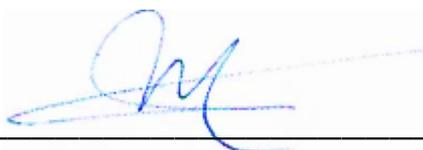
**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. 

**M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús**  
DECANO

f. 

**M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando**  
DIRETOR DE CARRERA

f. 

**M. Sc. Suárez Murillo, Efraín Oswaldo**  
OPONENTE

## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tablas.....	XIV
Resumen .....	XV
Capítulo 1: Generalidades del trabajo de titulación.....	2
1.1.  Introducción.....	2
1.2.  Antecedentes. ....	3
1.3.  Definición del Problema.....	3
1.4.  Justificación del Problema.....	4
1.5.  Objetivos del Problema de Investigación.....	4
1.5.1.  Objetivo General.....	4
1.5.2.  Objetivos Específicos. ....	4
1.6.  Hipótesis.....	4
1.7.  Metodología de Investigación.....	4
Capítulo 2: Fundamentación teórica de sistemas dinámicos .....	6
2.1.  Visión general del diseño de sistemas o procesos de control. ....	6
2.2.  Comportamiento dinámico de un sistema lineal, continuo e invariable	7
2.2.1.  Sistemas lineales.....	8
2.2.2.  Sistemas continuos y discretos.....	9
2.2.3.  Sistemas invariantes.....	10
2.3.  Fundamentos del sistema de control.....	10
2.3.1.  ¿Qué es control? .....	10
2.3.2.  Elementos de un sistema de control.....	11
2.4.  Ejemplos típicos de respuestas al escalon de sistemas dinámicos....	12
2.4.1.  Sistemas de retardo puro. ....	12
2.4.2.  Sistemas de modo aperiódico .....	13

2.4.3.	Sistemas oscilatorios y de desplazamiento de fase no-mínimas.	14
2.4.4.	Sistemas con comportamiento integrador y derivador.....	15
2.5.	Tipos de sistemas de control.....	17
2.5.1.	Sistema de bucle abierto. ....	19
2.5.2.	Sistemas de bucle cerrado. ....	20
2.6.	Modelización de sistemas mediante ecuaciones diferenciales.....	22
2.7.	Funciones de transferencia en los sistemas de control.....	24
Capítulo 3: Implementación, Simulación y Resultados obtenidos.....		26
3.1.	Breves descripción del trabajo de titulación. ....	26
3.2.	Práctica 1: uso de la herramienta de simulación MatLab/Simulink.....	26
3.3.	Práctica 2: modelado de sistema dinámico híbrido. ....	31
3.4.	Práctica 3: modelado de sistema retroalimentado usando controlador PI.....	37
Conclusiones. ....		40
Recomendaciones. ....		41
Bibliografía.....		42

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama de bloques de un sistema de control SISO (únicas entrada y salida). .....	8
Figura 2. 2: Diagrama de bloques de un sistema de control MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas).....	8
Figura 2. 3: Diagrama de bloques de un sistema lineal basado en los principios de proporcionalidad y superposición.....	9
Figura 2. 4: Diagrama de bloques de un sistema lineal basado en el principio de superposición.....	10
Figura 2. 5: Diagrama de bloques del muestreador y sus subsistemas.....	10
Figura 2. 6: Representación de un sistema de calefacción de habitaciones.	12
Figura 2. 7: Respuestas de índice de un sistema de retardo puro ( $y_1(t)$ ) y un sistema de retardo puro y constante de tiempo ( $y_2(t)$ ).....	12
Figura 2. 8: Gráfica de respuesta al escalón unitario con retardo.....	13
Figura 2. 9: Respuestas al escalón de un sistema de primer orden $y_1t$ y un sistema de alto orden $y_2t$ . .....	14
Figura 2. 10: Diagrama de bloques de FLC con sistema de control de temperatura de baño de agua.....	14
Figura 2. 11: Respuestas al escalón de un sistema oscilante $y_1t$ y un sistema .....	15
Figura 2. 12: Representación de una estructura de control mediante compensación en serie. ....	15
Figura 2. 13: Representación de una estructura de control mediante compensación en serie. ....	16
Figura 2. 14: Sistema físico de un motor DC. ....	16
Figura 2. 15: Sistema de control integrador doble para motores DC. ....	17
Figura 2. 16: Respuesta al escalón unitario de la posición angular de un motor DC.....	17

Figura 2. 17: Respuesta al escalón unitario de la velocidad angular de un motor DC. ....	17
Figura 2. 18: Diagrama de bloques de un sistema de control de bucle abierto. ....	19
Figura 2. 19: Diagrama de bloques de un sistema de control de bucle cerrado. ....	21
Figura 2. 20: Bloque del sistema de control de circuito cerrado retroalimentado. ....	22
Figura 2. 21: Aplicación del sistema de control de bucle cerrado retroalimentado. ....	22
Figura 2. 22: Representación esquemática de un circuito eléctrico RLC en serie. ....	23
Figura 2. 23: Diagrama esquemática del circuito eléctrico RLC en serie. ....	24

### **Capítulo 3**

Figura 3. 1: Ventana principal de la plataforma de simulación de MatLab... ..	27
Figura 3. 2: Ventana del entorno de simulación Simulink integrado en MatLab. ....	27
Figura 3. 3: Ventanas del entorno Simulink y navegador de la librería. ....	28
Figura 3. 4: Representación de bloques en el navegador de la librería de Simulink. ....	28
Figura 3. 5: Escenario de conversión de temperatura de la práctica 1. ....	30
Figura 3. 6: Diagramas de bloques (a) de sistema de control retroalimentado, (b) simplificado como función de transferencia y (c) en Simulink. ....	30
Figura 3. 7: Representación de respuesta al escalón de la práctica 1. ....	31
Figura 3. 8: Representación esquemática de un motor DC. ....	32
Figura 3. 9: Representación esquemática de un motor DC. ....	33
Figura 3. 10: Representación esquemática de un motor DC. ....	34
Figura 3. 11: Respuesta al escalón del sistema de bucle abierto para el motor DC. ....	35

Figura 3. 10: Representación esquemática de un motor DC. ....	36
Figura 3. 13: Representación esquemática de un motor DC. ....	36
Figura 3. 14: Representación esquemática de un motor DC. ....	37
Figura 3. 15: Representación esquemática de un motor DC. ....	38
Figura 3. 16: Representación esquemática de un motor DC. ....	38
Figura 3. 17: Representación esquemática de un motor DC. ....	39

## Índice de Tablas

### Capítulo 3

Tabla 3. 1: Bloques más relevantes en el modelado de sistemas de control. .....	29
Tabla 3. 2: Parámetros de simulación del motor DC.....	34

## Resumen

El presente documento se desarrolla el trabajo de titulación denominado “Diseño e implementación de sistemas de control retroalimentados utilizando MatLab/Simulink para prácticas de Teoría de Control”. En el presente trabajo de titulación se desarrollan tres aplicaciones prácticas de sistemas de control retroalimentados mediante el modelado de sistemas dinámicos. Por ejemplo, el uso del motor DC mediante simulación dinámica en el entorno de Simulink, se dan en una clase de control y dinámica de procesos de carreras de pregrado. Utilizando la herramienta de diseño en Simulink se pueden crear interfaces personalizadas que permiten a los estudiantes interpretar rápidamente los datos del proceso, así como realizar modificaciones en las operaciones de control en un marco intuitivo. Utilizando estas herramientas, se disponen de múltiples publicaciones en revistas científicas en las que han introducido una serie de estudios de caso en el plan de estudios de control de pregrado (módulos de control de procesos (PCM)).

**Palabras claves:** Control, Retroalimentado, Sistemas, Motor, Función de Transferencia, Simulación.

## **Capítulo 1: Generalidades del trabajo de titulación**

### **1.1. Introducción.**

Los sistemas de control automático se utilizan ampliamente para determinar la calidad de productos manufacturados, líneas de ensamblaje automáticas, inspección de máquinas y herramientas, tecnologías aeroespaciales, sistemas de armas, sistemas de control computarizado, sistemas de transporte y energía, robots y sectores industriales similares.

Los sistemas se pueden analizar utilizando Matlab/Simulink, así como los análisis en tiempo real y los sistemas se pueden controlar de acuerdo con los sistemas de control automático para recibir datos de un dispositivo como una tarjeta DAQ o un puerto serie o paralelo, y simultáneamente transferir y procesar los datos recibidos en el entorno Simulink. En este estudio, se presenta analiza el modelo matemático y simulación de sistemas de control mediante el entorno Matlab/Simulink, así como las cajas de herramientas Simulink.

Al estudiar Sistemas de Control, se requiere la capacidad de modelar sistemas dinámicos en términos matemáticos y analizar sus características dinámicas. Se puede representar el sistema dinámico usando un conjunto de ecuaciones diferenciales. Hay que tener en cuenta que no existe un solo conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernen un sistema, puede haber otras que sean válidas según la perspectiva. La obtención de estas ecuaciones diferenciales usando leyes fundamentales que gobiernan un sistema en particular (es decir, leyes de Newton para sistemas mecánicos, leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos, etc.). Es decir, que obtener y derivar estas ecuaciones es la parte más importante de todo el análisis de los sistemas de control.

Los modelos pueden adoptar muchas formas. Dependiendo del sistema, un modelo puede ser más adecuado que otro. Por ejemplo, el uso de la representación del espacio de estados (como se verá en el capítulo 2) es adecuado para problemas de control óptimos. Mientras que las funciones de

transferencia pueden ser más convenientes para la respuesta transitoria o el análisis de respuesta de frecuencia de una sola entrada, o para sistemas lineales invariantes en el tiempo de una sola salida.

El desarrollo del capítulo 2 y 3 no es aprender el modelado matemático de los sistemas dinámicos, sino contar con una herramienta como ayuda para el aprendizaje de los futuros estudiantes de la carrera de Electrónica y Automatización en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

## **1.2. Antecedentes.**

La tecnología de simulación de procesos ha evolucionado drásticamente durante los últimos 10 años con la creciente aplicación de la programación orientada a objetos. Hay muchos paquetes disponibles que permiten la visualización intuitiva de los datos del proceso junto con una interfaz gráfica fácil de usar que permite una síntesis rápida de los diagramas de flujo del proceso mediante operaciones de hacer clic y arrastrar. Estos paquetes son comunes en la industria tanto para el modelado de procesos como para el control de procesos en tiempo real. Un desafío importante para los instructores es preparar a los estudiantes para usar estas herramientas en su plan de estudios de ingeniería química de pregrado.

## **1.3. Definición del Problema.**

Los cursos de Teoría de Control en las carreras de Ingeniería Electrónica y Automatización se imparten en universidades durante más de cincuenta años. Los temas teóricos básicos que se enseñan en lo que ahora se conoce como control clásico han cambiado poco a lo largo de los años, pero las herramientas de simulación (código e interfaz gráfica) que pueden usarse para respaldar el análisis teórico y las tecnologías utilizadas en la implementación de sistemas de control han cambiado más allá del reconocimiento. De acuerdo con esto, surge la necesidad de realizar el diseño e implementación de sistemas de control retroalimentados utilizando MatLab/Simulink para prácticas de Teoría de Control que fomenten a los futuros ingenieros en electrónica a profundizar en el tema de sistemas de control retroalimentados.

#### **1.4. Justificación del Problema.**

Un sistema de control completo puede estar compuesto por múltiples componentes. Para mostrar las funciones que realiza cada componente, en la ingeniería de control se utiliza lo que se conoce como diagramas de bloques. Un diagrama de bloque de un sistema es una representación gráfica de las funciones realizadas por cada componente y el flujo de señales. Estos diagramas tienen la ventaja sobre los modelos matemáticos de poder indicar de manera más realista el flujo de señales del sistema. En el capítulo 3 se desarrollan tres aplicaciones prácticas orientadas a la materia de Teoría de Control utilizando el entorno de simulación Simulink.

#### **1.5. Objetivos del Problema de Investigación.**

##### **1.5.1. Objetivo General.**

Realizar el diseño e implementación de sistemas de control retroalimentados utilizando MatLab/Simulink para prácticas de Teoría de Control.

##### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

- Describir los fundamentos teóricos de los sistemas dinámicos lineales a través del modelado matemático
- Realizar el diseño e implementación de tres aplicaciones prácticas de los sistemas de control retroalimentado utilizando el entorno de simulación por bloques Simulink.
- Evaluar los resultados obtenidos de la respuesta al escalón de los sistemas retroalimentados.

#### **1.6. Hipótesis.**

Los sistemas retroalimentados se crean al retroalimentar la salida del sistema a una función de transferencia que luego se compara con un valor de referencia que luego se retroalimenta al sistema como una entrada.

#### **1.7. Metodología de Investigación.**

El presente trabajo se emplea un enfoque cuantitativo, ya que se obtienen datos numéricos durante la simulación. El diseño de investigación es

descriptivo, exploratorio, explicativo y simulación. Descriptivo, porque se describen los fundamentos teóricos de los sistemas dinámicos. Exploratorio, porque se exploran las opciones de las herramientas de simulación para el modelado matemático de los sistemas de control retroalimentados. Explicativo, porque se explican los resultados obtenidos en cada escenario de simulación propuesto. Simulado, porque se modelan los sistemas de control de lazo cerrado en el software MatLab/Simulink.

## Capítulo 2: Fundamentación teórica de sistemas dinámicos

### 2.1. Visión general del diseño de sistemas o procesos de control.

Cuando se diseñan sistemas o procesos de control, la formación de un modelo que los acompaña ahora suele formar parte del "buen" enfoque de la ingeniería. El modelo matemático resultante del sistema o proceso se puede utilizar de diferentes formas:

#### a) **Análisis del comportamiento del sistema:**

Sobre la base de un modelo, se pueden obtener conocimientos sobre el comportamiento del sistema. B. inestable o vibratorio? ¿Qué constantes de tiempo tiene?

#### b) **Predicción del comportamiento del sistema:**

La dinámica del sistema se puede simular numéricamente. Una simulación ya se puede realizar en la fase de diseño y, a menudo, es menos costosa y peligrosa que los experimentos reales.

#### c) **Diseño del controlador:**

El modelo es la base del diseño del controlador que puede incluirse inteligencia artificial (por ejemplo, algoritmos genéticos y difusos).

#### d) **Diagnóstico y seguimiento:**

Se puede utilizar un modelo para detectar errores en línea durante la operación del proceso y, si es necesario, para desencadenar un mensaje de error. Por ejemplo, se podría monitorear la corriente de un accionamiento eléctrico: si la diferencia entre la medición y el cálculo basado en el modelo es demasiado grande, se puede activar una alarma.

#### e) **Optimización:**

Sobre la base del modelo, por ejemplo, los parámetros del sistema se pueden optimizar para permitir un funcionamiento eficiente en el uso de los recursos.

Por ejemplo, para garantizar las especificaciones impuestas por los sistemas de servomotores (controlador de estabilidad, velocidad, precisión, etc.), el regulador no puede elegirse y dimensionarse al azar. Por el contrario, obtener el mejor rendimiento requiere tener en cuenta las propiedades y

parámetros del sistema a ajustar (ganancia estática, retardo puro, inercia, constante de tiempo, etc.).

Dado que rara vez están disponibles en los catálogos y sólo en muy raras ocasiones se toman de los planos de diseño de la instalación, los parámetros del sistema que deben ajustarse pueden/deben obtenerse, en principio, mediante experimentos y mediciones.

Hay que tener en cuenta que todas estas propiedades vienen determinadas por las leyes físicas que rigen el sistema y que están convenientemente condensadas en el modelo matemático del sistema a regular. Este modelo, así construido sobre la base de las leyes físicas, se llama modelo de conocimiento. La modelización del conocimiento es, por tanto, la fase de un proyecto de control automático que consiste en la obtención de las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema a controlar.

Al disponer de un modelo de este tipo, se evita tener que realizar mediciones en el sistema real para cada caso que se vaya a analizar y se pueden así limitar los costes (duración de las pruebas, desplazamientos, etc.) y, a veces, los riesgos, utilizando un simulador (MatLab, LabVIEW, SysQuake, etc.).

También hay situaciones en las que el sistema real aún no existe. Además, ciertas propiedades (ganancia estática, estructura, etc.) del sistema aparecen con mayor claridad si se establece el modelo de conocimiento, lo que permite, por ejemplo, determinar con precisión las modificaciones que deben realizarse en una instalación para que su servosistema sea más eficaz.

## **2.2. Comportamiento dinámico de un sistema lineal, continuo e invariable**

Un sistema dinámico es un sistema físico cuyo estado (conjunto de cantidades suficientes para calificar el sistema) evoluciona en función del tiempo. El estudio de la evolución de un sistema dinámico requiere, por tanto, el conocimiento de:

- a) su estado inicial: valores de sus magnitudes características en el momento inicial del estudio.
- b) su ley de evolución: ecuaciones diferenciales que relacionan sus magnitudes características.

Sus magnitudes características son, por tanto, magnitudes físicas que son funciones del tiempo, por ejemplo, posición  $x(t)$ , temperatura  $\theta(t)$ , ..., entre otras. Un sistema dinámico puede verse como un proceso que transforma una señal de entrada  $U(t)$  en una señal de salida  $y(t)$ , tal como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2.1. Comúnmente estos sistemas de control se denominan SISO (única señal de entrada y única señal de salida) tal como se muestra en la figura 2.1. En el caso general, un sistema puede tener varias entradas (causas) y varias salidas (efectos) también denominado sistemas de control multivariable (MIMO) tal como se muestra en la figura 2.2.

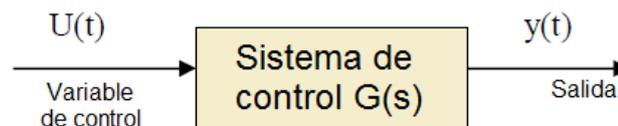


Figura 2. 1: Diagrama de bloques de un sistema de control SISO (únicas entrada y salida).

Fuente: (Curipayo Aguilar, 2021; Jurado Jaramillo, 2019)

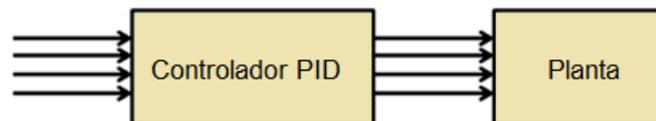


Figura 2. 2: Diagrama de bloques de un sistema de control MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas).

Fuente: (Halim & Ismail, 2019)

### 2.2.1. Sistemas lineales.

Es un sistema cuyas magnitudes características están vinculadas por ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes. Los sistemas lineales se basan en el principio de: (a) proporcionalidad y (b) superposición. La figura 2.3 (a), (b), (c) y (d) muestran las propiedades de proporcionalidad y linealidad de los sistemas lineales (Ortiz Moctezuma, 2015). La noción de linealidad es fundamental en la calibración de instrumentos de medición, sin embargo, hay presencia de perturbaciones propias del sistema.

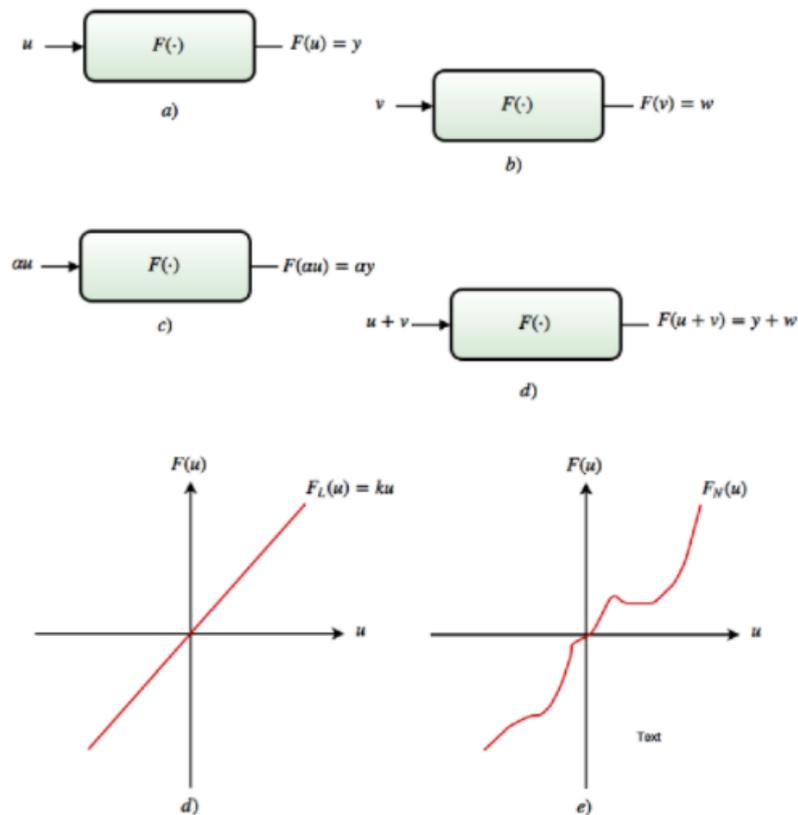


Figura 2. 3: Diagrama de bloques de un sistema lineal basado en los principios de proporcionalidad y superposición.  
Fuente: (Ortiz Moctezuma, 2015)

### 2.2.2. Sistemas continuos y discretos.

La figura 2.4 muestra el sistema de control digital en su forma más elemental. Aquí S es el muestreador, que se encarga de convertir la señal de salida analógica de la planta  $y(t)$  en el momento  $t$  en una señal de medición digital  $y[k]$  en el tiempo discreto  $k$ . Por ejemplo, la señal digital se obtiene mediante muestreo y cuantificación de la señal analógica. Finalmente, H denota el convertidor digital-analógico (*Digital-to-Analog Converter, DAC*), convierte la señal de control digital  $u[k]$  proporcionada por el controlador en una señal de control analógica  $u(t)$ .

La figura 2.5 muestra que el muestreador existe a partir de dos dispositivos, a saber; (a) un dispositivo de muestreo y retención (*Sample and Hold, SH*) y (b) un convertidor analógico-digital (ADC). El dispositivo SH conoce dos estados diferentes. El primer estado se denomina estado de

seguimiento en el que el dispositivo SH rastrea la señal de entrada analógica. El estado de la pista también se denomina estado de muestra.

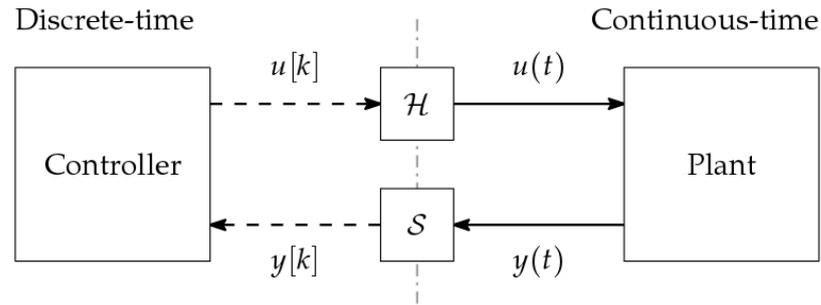


Figura 2. 4: Diagrama de bloques de un sistema lineal basado en el principio de superposición.

Fuente: (Wouter, 2017)

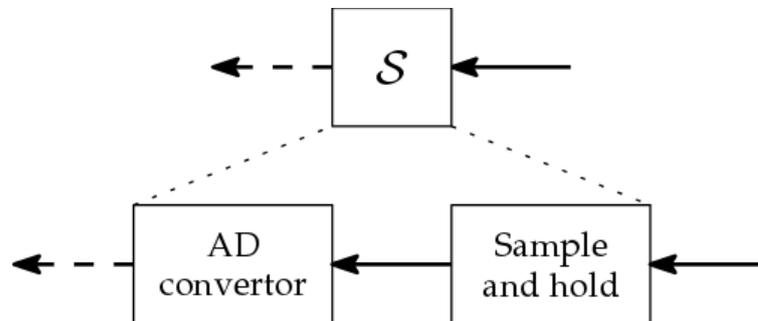


Figura 2. 5: Diagrama de bloques del muestreador y sus subsistemas.

Fuente: (Wouter, 2017)

### 2.2.3. Sistemas invariantes

Es un sistema cuya ley de evolución no cambia con el tiempo. Esto es cierto si asumimos que las cantidades características del sistema (masa, dimensiones, resistencia, impedancia, ...) no varían con el tiempo.

## 2.3. Fundamentos del sistema de control.

En esta sección se presenta la definición básica de control y los elementos de control.

### 2.3.1. ¿Qué es control?

La palabra control generalmente significa ajustar, regular, dirigir o mandar. Por definición; Es un conjunto de operaciones realizadas para adaptar una cantidad variable o un conjunto de cantidades variables a una condición predeterminada. De manera más simple, el control se define como encender, detener o ajustar el sistema de (a) variación de velocidad en

motores DC, (b) calefacción, (c) procesos químicos, (d) paneles solares fotovoltaicos, (e) aire acondicionado, entre otras aplicaciones que se dan en los sistemas dinámicos. Por ejemplo, el control de un sistema de paneles solares fotovoltaicos incluye tres pasos diferentes:

1. Medir una variable y recopilar datos
2. Procesamiento de datos junto con otra información
3. Inicio de un proceso de control

Las tres funciones anteriores las cumplen el sensor, el controlador y el dispositivo controlado.

### **2.3.2. Elementos de un sistema de control.**

Por ejemplo, desde el termostato de ambiente más simple hasta el control computarizado más complejo, todos los sistemas de control de aire acondicionado tienen cuatro elementos clave: el sensor, el controlador, el dispositivo controlado y la fuente de energía. A continuación, se describe las funciones de cada elemento:

- 1) El sensor mide el valor real de la variable controlada, como temperatura, humedad o flujo, y proporciona información al controlador.
- 2) El controlador recibe la entrada del sensor, procesa la entrada y luego genera la señal de salida inteligente para el dispositivo controlado.
- 3) El dispositivo controlado realiza la tarea de cambiar la variable controlada administrada por el controlador.
- 4) Se requiere la fuente de energía para alimentar el sistema de control. Los sistemas de control utilizan una fuente de energía eléctrica o neumática.

La figura 2.6 a continuación muestra un circuito de control básico para la calefacción de habitaciones. En este ejemplo, el termostato incluye tanto el sensor como el controlador. El propósito de este lazo de control es mantener la variable controlada (temperatura del aire de la habitación) para un valor deseado, llamado valor establecido. La energía térmica necesaria para

realizar el calentamiento es proporcionada por un radiador y el dispositivo controlado es una válvula de solenoide o motorizada de 2 vías que controla el flujo de agua caliente al radiador.

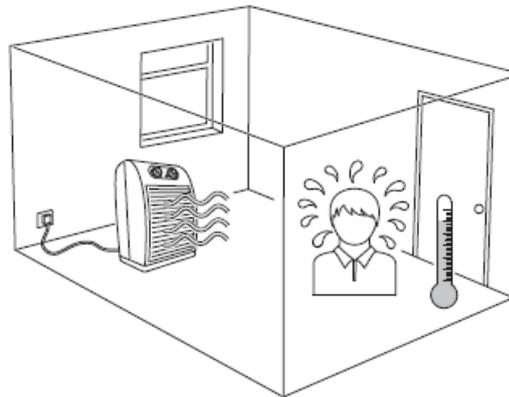


Figura 2. 6: Representación de un sistema de calefacción de habitaciones.  
Fuente: (Roskilly & Mikalsen, 2015)

## 2.4. Ejemplos típicos de respuestas al escalon de sistemas dinámicos.

Para ilustrar la importancia del modelado del conocimiento del comportamiento dinámico del sistema a controlar, los párrafos siguientes presentan la forma de la respuesta al escalón de los sistemas dinámicos lineales que se encuentran más o menos frecuentemente en la práctica. En general, la convención es denotar la señal de entrada por  $u(t)$  y la señal de salida por  $y(t)$  (ver la figura 2.1).

### 2.4.1. Sistemas de retardo puro.

Un sistema que exhibe un retardo puro es tal que su respuesta a una entrada aplicada en el tiempo  $t$  está influenciada por dicha entrada solo durante un período  $T_r$  posterior. La figura 2.4 ilustra el comportamiento de tales sistemas.

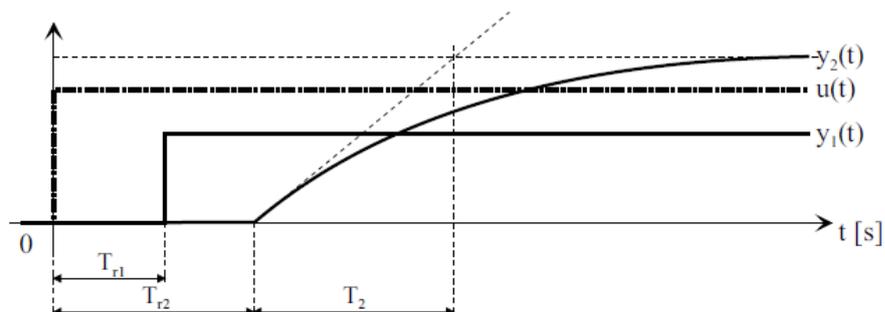


Figura 2. 7: Respuestas de índice de un sistema de retardo puro ( $y_1(t)$ ) y un sistema de retardo puro y constante de tiempo ( $y_2(t)$ ).

Fuente:

Por ejemplo, un sistema de retardo puro (pequeño) sería el servo regulador digital donde el tiempo de ejecución finito del algoritmo de regulación, así como los tiempos de conversión A/D y conversión D/A que representan aproximadamente un retardo puro de uno. La figura 2.8 en la página siguiente muestra la respuesta al escalón con retardo puro como constantes de tiempo.

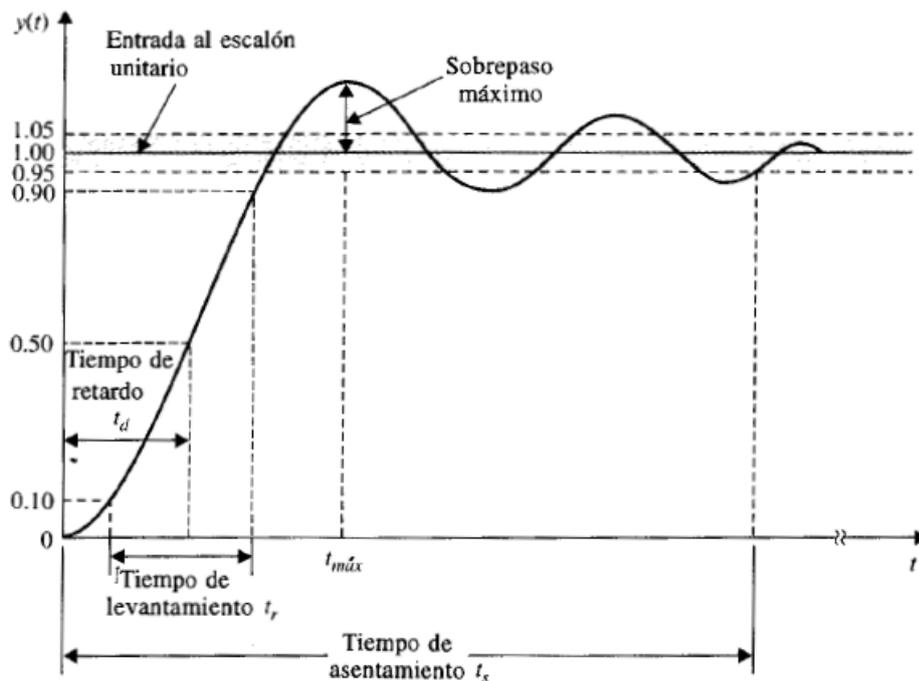


Figura 2. 8: Gráfica de respuesta al escalón unitario con retardo.  
Fuente: (Phillips & Parr, 2011)

#### 2.4.2. Sistemas de modo aperiódico

En la figura 2.9 se representa las respuestas al escalón de 2 sistemas. Como no muestran oscilación, se habla de respuestas aperiódicas y, en consecuencia, de sistemas de modos aperiódicos. La respuesta al escalón de un filtro RC de paso bajo o la de un motor de corriente continua (<500 W) (entrada = voltaje a través del inducido, salida = velocidad angular) tiene una apariencia similar.

En ambos casos, este es un comportamiento que va en detrimento de la estabilidad, ya que se ralentiza la propagación de señales en el bucle. En la práctica, a menudo se tiende a hablar simplemente de "retraso" en ambos casos.

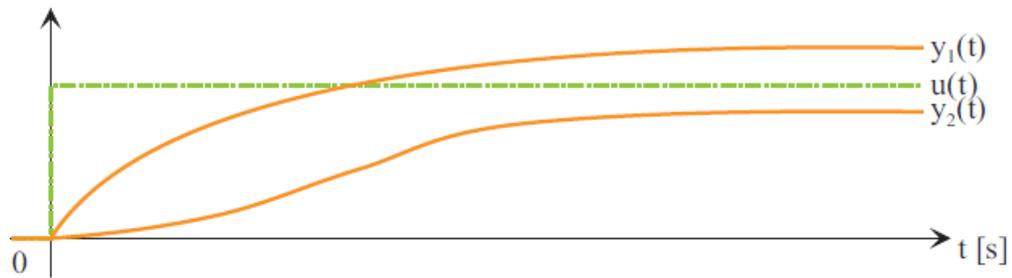


Figura 2. 9: Respuestas al escalón de un sistema de primer orden  $y_1(t)$  y un sistema de alto orden  $y_2(t)$ .  
Elaborado por: Autor.

La figura 2.10 muestra el sistema de control de una ducha eléctrica cuyo objetivo principal es lograr la temperatura de salida del sistema de baño de agua con un buen rendimiento, estable, suave y con el menor rebasamiento tan cercano como la temperatura de punto de ajuste deseada en un período de tiempo especificado. Cabe señalar que, desde el punto de vista de un regulador, el efecto de un retardo puro o el de una constante de tiempo (ver figura 2.7) son bastante similares.

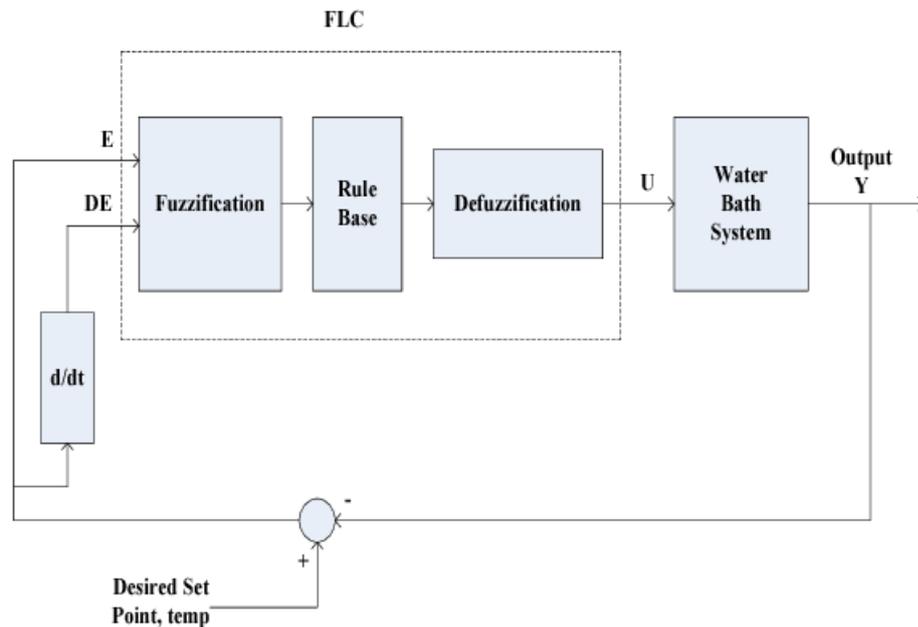


Figura 2. 10: Diagrama de bloques de FLC con sistema de control de temperatura de baño de agua.  
Fuente: (Octavia et al., 2014)

### 2.4.3. Sistemas oscilatorios y de desplazamiento de fase no-mínimas.

La figura 2.11 ilustra el comportamiento en régimen transitorio de un sistema que tiende a oscilar (la excitación  $u(t)$  ha excitado el modo oscilatorio del sistema) así como un sistema de desplazamiento.

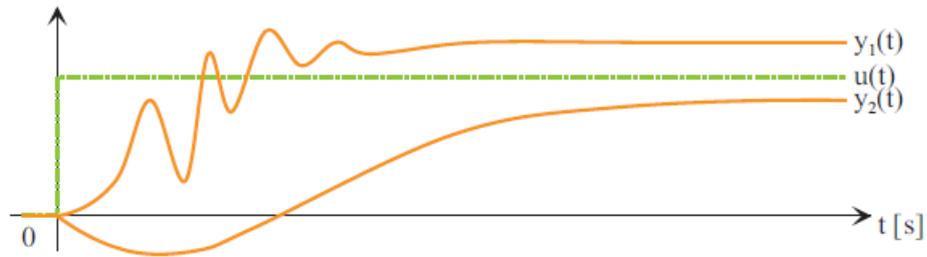


Figura 2. 11: Respuestas al escalón de un sistema oscilante  $y_1(t)$  y un sistema con desplazamiento de fase no mínimo  $y_2(t)$ .  
Elaborado por: Autor.

La figura 2.12 muestra la respuesta al escalón de un servomotor controlado por par que acciona una carga mecánica flexible. Un sistema de desplazamiento de fase no mínimo es un sistema dinámico cuya respuesta temporal típica comienza a moverse en la dirección opuesta a la excitación.

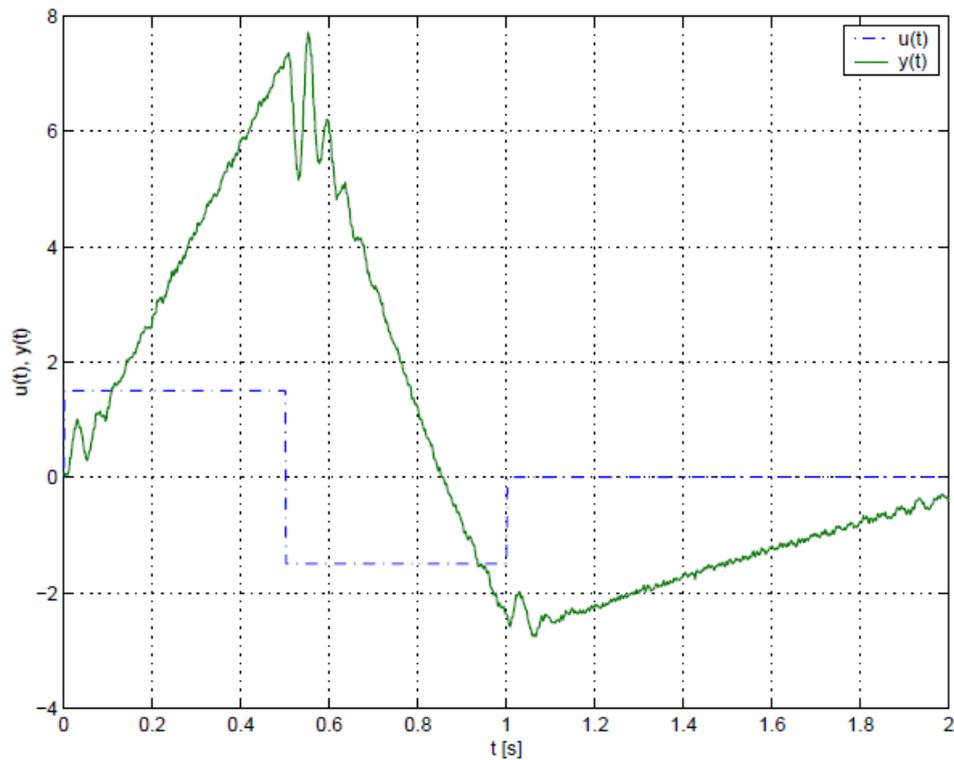


Figura 2. 12: Representación de una estructura de control mediante compensación en serie.  
Fuente: (Jurado Jaramillo, 2019)

#### 2.4.4. Sistemas con comportamiento integrador y derivador

Un sistema tiene un comportamiento integrador si su salida  $y(t)$  es proporcional a la integral de su entrada  $u(t)$ . Cuando éste adopta la forma de un salto,  $y_1(t)$  es, por tanto, una rampa (véase la 2.13). Un motor de corriente

continua tiene un comportamiento integrador entre el voltaje  $u(t)$  en su inducido y la posición angular  $\theta(t)$  de la carga mecánica. Se puede demostrar fácilmente que el mismo motor, bajo la suposición de que el rozamiento viscoso  $R_f$  es nulo, tiene un comportamiento derivado entre su voltaje  $u(t)$  y la corriente de inducido  $i(t)$ , es decir, tal que las bajas frecuencias (señales de CC) no se transmiten en la salida  $i(t)$ .

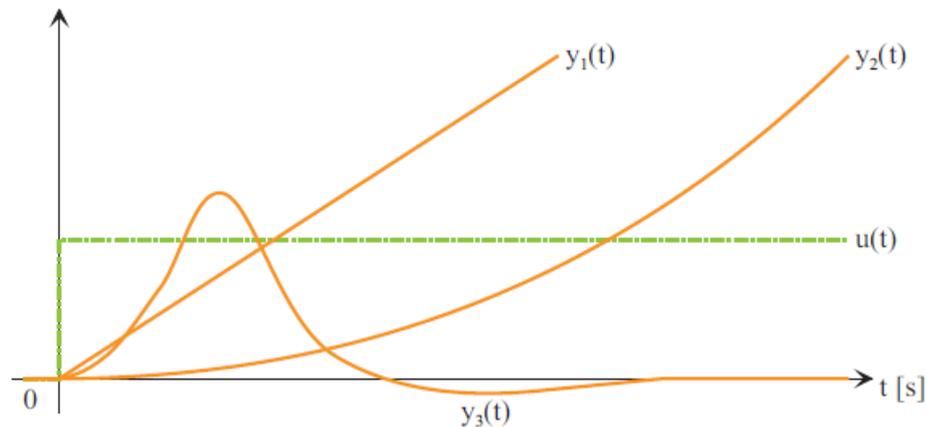


Figura 2. 13: Representación de una estructura de control mediante compensación en serie.

Elaborado por: Autor.

Un sistema integrador doble suele encontrarse en aplicaciones de control de posición donde el par electromagnético  $T_{em}(t)$  se impone electrónicamente con cierta precisión y la posición  $\theta(t)$  se utiliza como variable controlada. La figura 2.14 muestra el esquemático del sistema dinámico de un motor DC con fricción viscosa. La figura 2.15 muestra el diagrama de bloques del sistema de control integrador doble típico para motores DC.

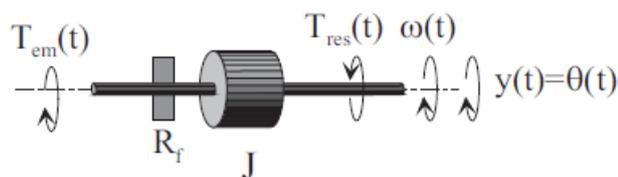


Figura 2. 14: Sistema físico de un motor DC.

Elaborado por: Autor.

La figura 2.16 muestra el resultado de las mediciones en un sistema real integrador doble. La figura 2.17 muestra los resultados obtenidos en las mismas condiciones, pero cuando la señal de salida seleccionada es la

velocidad en lugar de la posición. El patrón típico de rampa cuando la señal de entrada es un salto refleja un comportamiento integrador.

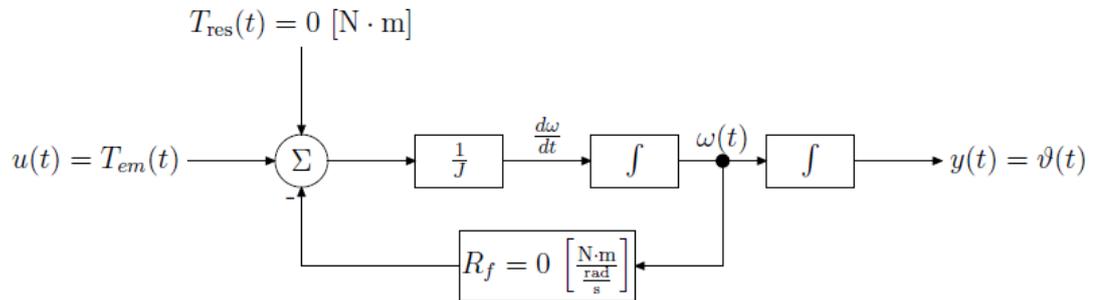


Figura 2. 15: Sistema de control integrador doble para motores DC.  
Elaborado por: Autor.

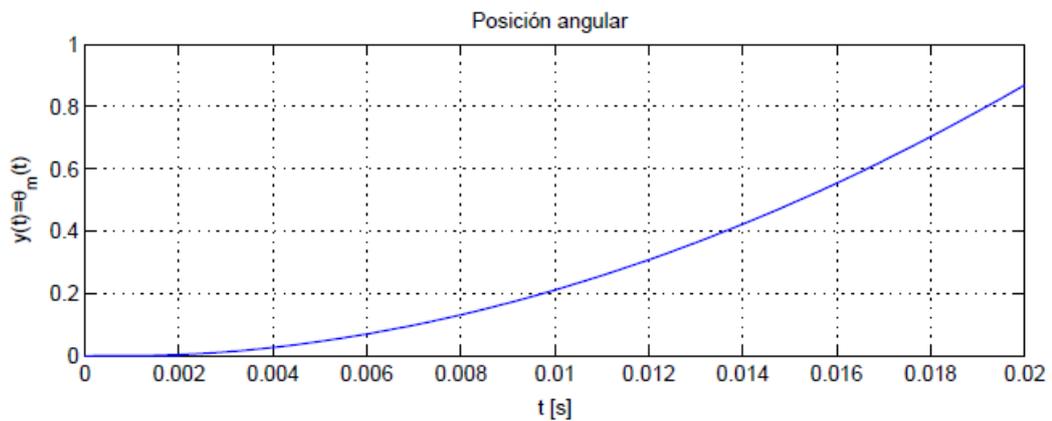


Figura 2. 16: Respuesta al escalón unitario de la posición angular de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

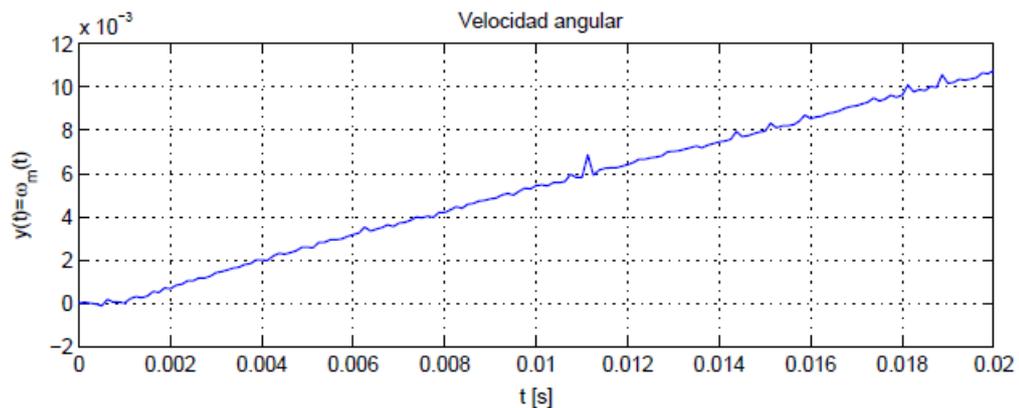


Figura 2. 17: Respuesta al escalón unitario de la velocidad angular de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

## 2.5. Tipos de sistemas de control.

Hay varios tipos de sistemas de control, pero todos ellos se crean para controlar las salidas. El sistema utilizado para controlar la posición, la velocidad, la aceleración, la temperatura, la presión, la tensión y la corriente,

etc., son ejemplos de sistemas de control. Se toma un ejemplo del simple regulador de temperatura de la habitación (ver sección 2.3.2), para aclarar el concepto. Se supone que hay un simple elemento calefactor, que se calienta mientras la fuente de alimentación eléctrica está conectada. Mientras el interruptor de la fuente de alimentación del calentador está encendido, la temperatura de la habitación aumenta y después de alcanzar la temperatura deseada de la habitación, la fuente de alimentación se desconecta.

De nuevo, debido a que la temperatura de la habitación disminuye, se enciende de forma manual el elemento calefactor para alcanzar de nuevo la temperatura deseada. De este modo, se puede controlar manualmente la temperatura al nivel deseado. Este es un ejemplo de sistema de control manual, aunque puede mejorarse aún más utilizando una disposición de conmutación de la fuente de alimentación con un temporizador en el que el suministro al elemento calefactor se enciende y apaga en un intervalo predeterminado para alcanzar el nivel de temperatura deseado de la habitación.

Existe otra forma mejorada de controlar la temperatura de la habitación. Aquí un sensor mide la diferencia entre la temperatura real y la deseada. Ambas formas del sistema son de control automático. En la primera, la entrada del sistema es totalmente independiente de la salida de este. La temperatura de la habitación (salida) aumenta mientras el interruptor de la fuente de alimentación se mantenga encendido. Esto significa que el elemento calefactor produce calor mientras la fuente de alimentación se mantenga encendida y la temperatura final de la habitación no tiene ningún control sobre la fuente de alimentación de entrada del sistema. Este sistema se denomina sistema de control de bucle abierto. Si hay alguna diferencia entre ellas, el elemento calefactor funciona para reducir la diferencia y cuando ésta es inferior a un nivel predeterminado, los elementos calefactores dejan de funcionar.

Pero en este último caso, los elementos calefactores del sistema funcionan en función de la diferencia entre la temperatura real y la deseada.

Esta diferencia se denomina error del sistema. Esta señal de error se retroalimenta al sistema para controlar la entrada. Como la ruta de entrada a la salida y la ruta de retroalimentación del error crean un bucle cerrado, este tipo de sistema de control se denomina sistema de control de bucle cerrado.

Por lo tanto, hay dos tipos principales de sistemas de control que se utilizan en el modelado matemático, que son: (a) sistemas de control de lazo abierto (véase sección 2.5.1), y (b) sistemas de control de lazo cerrado o retroalimentado (véase sección 2.5.2).

### 2.5.1. Sistema de bucle abierto.

Un sistema de control de lazo abierto proporciona instrucciones iniciales a los equipos, pero no ofrece ningún medio para recopilar datos y comparar las suposiciones subyacentes a esas instrucciones con la realidad de lo que el equipo produce realmente. Estas técnicas de control son aceptables (y de menor coste) si el funcionamiento del equipo es razonablemente predecible, y las consecuencias de la desviación de las condiciones de salida asumidas son mínimas y aceptables. (Dunn, 2015)

Un sistema de control de lazo abierto es un sistema de control en el que la salida del sistema no influye en las acciones de control (véase la figura 2.18). En un sistema de control de lazo abierto, una secuencia de acciones de control se calcula previamente y se almacena en un controlador de avance, y luego se ejecuta cuando se activa un disparador. Una vez iniciada la acción de control, no puede ajustarse en función de la respuesta del sistema o de las cargas externas que actúan sobre él. (Mehrabi & McPhee, 2019)

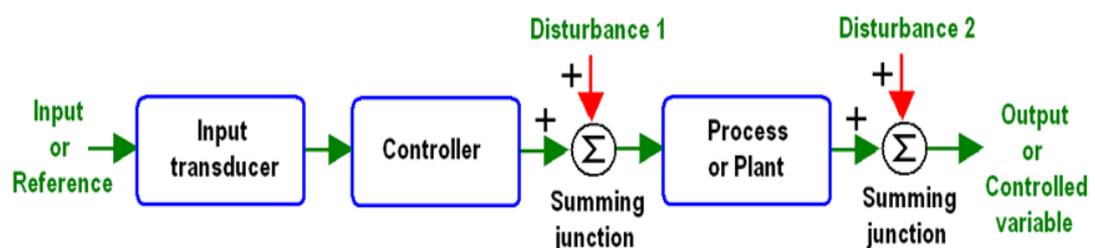


Figura 2. 18: Diagrama de bloques de un sistema de control de bucle abierto.

Fuente: (Khatri, 2010; Nise, 2015)

Algunos ejemplos básicos de sistemas de control de bucle abierto en la vida cotidiana son:

- 1) Secador de manos eléctrico: el aire caliente (salida) sale mientras se mantenga la mano debajo de la máquina, independientemente del grado de secado de la mano.
- 2) Lavadora automática: esta máquina funciona según el tiempo preestablecido, independientemente de que el lavado se haya completado o no.
- 3) Tostadora de pan: esta máquina funciona según el tiempo ajustado independientemente de que se haya completado el tostado o no.
- 4) Cafetera automática: estas máquinas también funcionan sólo durante el tiempo preestablecido.
- 5) Secadora de ropa con temporizador: esta máquina seca la ropa mojada durante el tiempo preajustado, no importa cuánto se haya secado la ropa.
- 6) Interruptor de la luz: las lámparas se encienden siempre que el interruptor de la luz está encendido, independientemente de si se necesita luz o no.
- 7) Volumen en el sistema estéreo: el volumen se ajusta manualmente independientemente del nivel de volumen de salida.

### **2.5.2. Sistemas de bucle cerrado.**

Los sistemas de control en los que la salida tiene un efecto sobre la cantidad de entrada de tal manera que la cantidad de entrada se ajustará a sí misma en función de la salida generada se denomina sistema de control de bucle cerrado. Un sistema de control de bucle abierto puede convertirse en un sistema de control de bucle cerrado mediante la retroalimentación. Esta retroalimentación realiza automáticamente los cambios adecuados en la salida debido a una perturbación externa. De este modo, un sistema de control de bucle cerrado se denomina sistema de control automático.

Como se muestra en la figura 2.19, en un sistema de control de lazo cerrado con un controlador de retroalimentación, el sistema emite retroalimentación al controlador para regular la acción de control. Los

controladores de retroalimentación basados en la dinámica del sistema pueden clasificarse en controladores de retroalimentación lineales y no lineales.

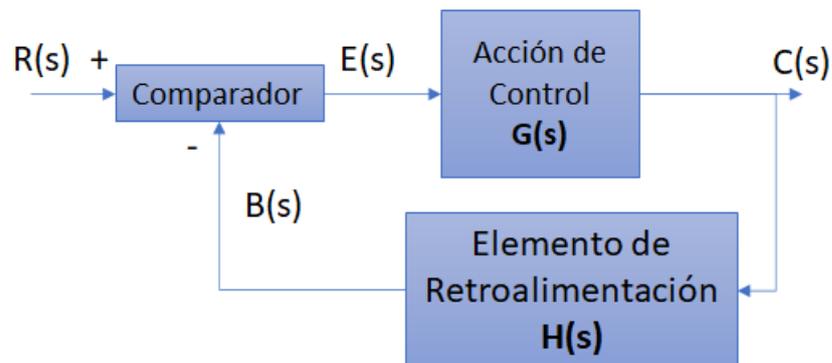


Figura 2. 19: Diagrama de bloques de un sistema de control de bucle cerrado.  
Fuente: (Khatri, 2010; Nise, 2015)

Ahora, se presenta la expresión matemática que se obtiene al analizar el diagrama de bloques de la figura 2.19. La expresión matemática que se obtiene se denomina función de transferencia (*Transfer Function, TF*) de bucle cerrado la misma relaciona la señal de entrada  $R(s)$  con la señal de salida  $C(s)$  y se define como:

$$C(s) = G(s)E(s) \quad (2.1)$$

$$B(s) = H(s)C(s) \quad (2.2)$$

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad (2.3)$$

Remplazando las ecuaciones 2.1 y 2.2 en la ecuación 2.3, se obtiene la función de transferencia:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.4)$$

La figura 2.20 presenta de forma esquemática la solución mediante el control en bucle cerrado. La figura 2.20 (a) muestra el diagrama estructural, mientras que la figura 2.20 (b) muestra el diagrama de funcionamiento. La velocidad del motor se mide con un tacómetro, cuyo voltaje de salida es proporcional a la velocidad. El voltaje medido se compara con el voltaje de la señal de referencia fijada por la fuente de alimentación, que es proporcional al valor prescrito de la velocidad. La señal de error acciona el motor de

corriente continua del actuador (Keviczky et al., 2019). Roskilly & Mikalsen, (2015b) muestran en la figura 2.21 un sistema de calefacción de una habitación.

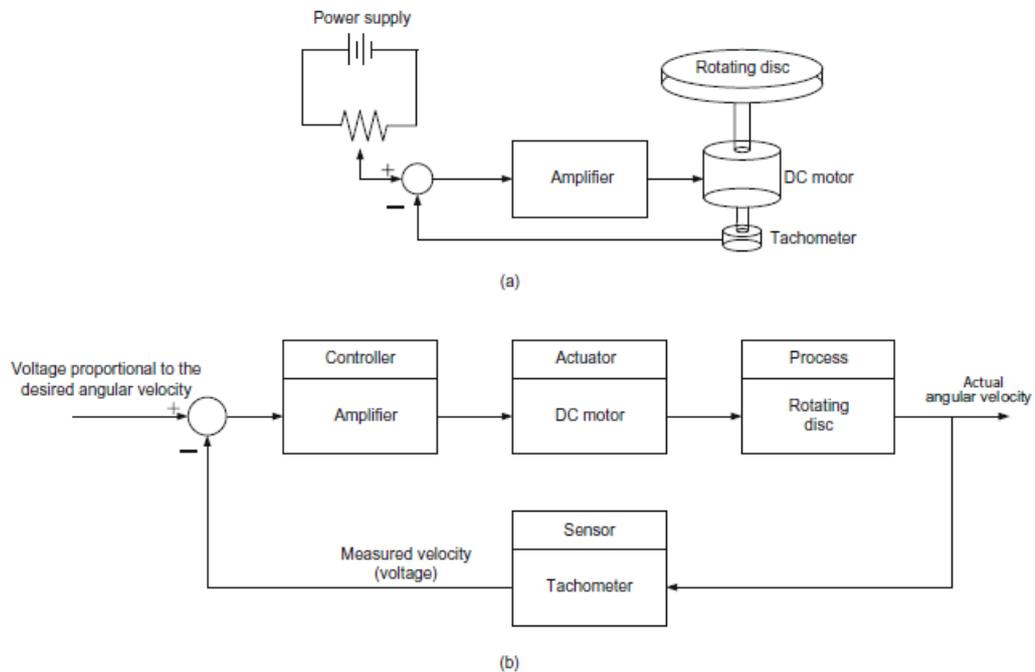


Figura 2. 20: Bloque del sistema de control de circuito cerrado retroalimentado. Fuente: (Keviczky et al., 2019)

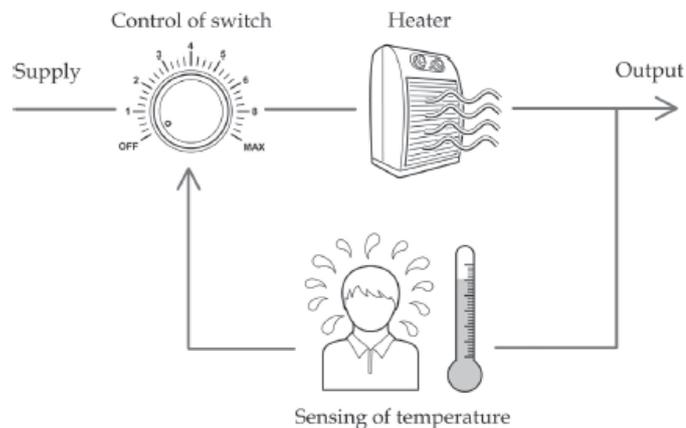


Figura 2. 21: Aplicación del sistema de control de bucle cerrado retroalimentado. Fuente: (Roskilly & Mikalsen, 2015)

## 2.6. Modelización de sistemas mediante ecuaciones diferenciales

Para entender un sistema de control interesa establecer el modelo del conocimiento (es decir, el modelo matemático basado en las leyes físicas que rigen el comportamiento del sistema considerado) por ejemplo, un circuito RLC en serie (véase la figura 2.22 (a)). La señal de entrada considerada es el voltaje  $u_e(t)$  mientras que la señal de salida es el voltaje  $u_s(t)$  a través del

condensador. El sistema mostrado en la figura 2.22 (a) se supone lineal, lo que implica que la inductancia  $L$  es constante y no depende del nivel de corriente  $i(t)$ .

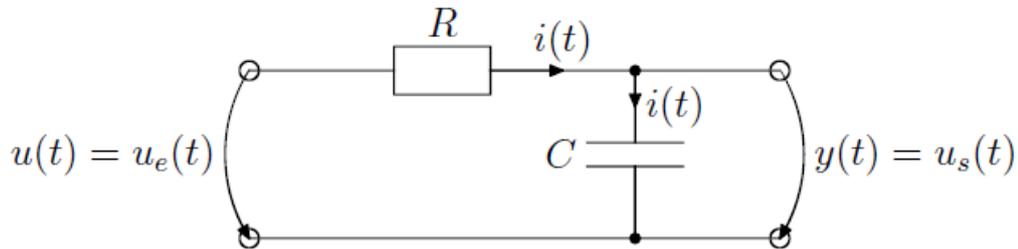


Figura 2. 22: Representación esquemática de un circuito eléctrico RLC en serie.  
Fuente: (Alexander et al., 2018)

Según la ley de Kirchhoff de Voltaje (LKV), se obtiene:

$$u_e(t) = V_R + V_L + V_C$$

$$u_e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{c} \int_{-\infty}^t i(t) dt$$

pero,

$$u_s(t) = V_C = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^t i(t) dt$$

Las ecuaciones anteriores pueden reelaborarse para presentarlas en forma canónica, es decir, en una forma tal que se tenga “n” ecuaciones diferenciales de orden 1:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i(t) - \frac{1}{L}u_s(t) + \frac{1}{L}u_e(t)$$

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{1}{C}i(t)$$

El orden de un sistema dinámico lineal es el número de ecuaciones diferenciales de orden 1 necesarias para modelarlo, por lo que con el circuito RLC en serie se tiene un sistema de orden 2, en el cual  $n=2$ . Utilizando estas últimas ecuaciones, se puede construir fácilmente un diagrama de bloques detallado, tal como se ilustra en la figura 2.23. Se observa en la figura 2.23 la estructura interna (desde el punto de vista del comportamiento dinámico) del

sistema (en términos de comportamiento dinámico) estudiado. Una regla básica para la construcción de tales diagramas es utilizar sólo integradores como elementos dinámicos, siendo los otros bloques disponibles para ganancias y comparadores. El número de integradores estrictamente necesario es  $n$ , es decir, 2 en este ejemplo (implementación mínima).

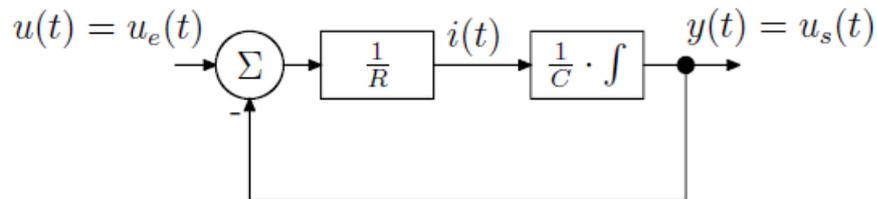


Figura 2. 23: Diagrama esquemática del circuito eléctrico RLC en serie.  
Fuente: (Alexander et al., 2018)

En general, el modelado matemático de sistemas dinámicos en especial los orientados a la carrera de ingeniería eléctrica ha permitido que se desarrollen nuevos métodos para el control, por ejemplo, controlar o regular el voltaje de un modulo de paneles solares fotovoltaicos (combinación de celdas en serie y paralelo). En la siguiente sección se describen las funciones de transferencia que son de gran utilidad para poder implementar el modelado matemático mediante programas de simulación, tales como, MatLab/Simulink, LabVIEW, entre otras.

## 2.7. Funciones de transferencia en los sistemas de control.

Para describir la parte conceptual de la función de transferencia se considera a un sistema lineal (ver figura 2.1) cualquiera con una entrada  $u(t)$  y una salida  $y(t)$ . Se supone que se rige por una ecuación diferencial de grado  $n$  definida por:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u(t)$$

El primer uso interesante del modelo laplaciano reside en la solución sistemática de problemas físicos en los que se tiene cualquier sistema lineal gobernado por una ecuación diferencial claramente identificada en la ecuación anterior. A la entrada de este sistema se inyecta una señal dada y se desea determinar lo que es la señal de salida. Si se aplica la transformación de Laplace a ambos miembros de esta ecuación, y suponiendo cero para las

distintas condiciones iniciales (tabla de propiedades de la Transformada de Laplace), se obtiene:

$$a_n s^n Y(s) + \dots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m U(s) + \dots + b_1 s U(s) + b_0 U(s)$$

o bien,

$$Y(s)(a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0) = U(s)(b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0)$$

despejando queda,

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}$$

Esta fracción racional de dos polinomios de la variable compleja  $p$  se llama función de transferencia del y se conoce comúnmente como:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Como esta función es una fracción racional de dos polinomios en " $s$ ", es posible factorizar estos dos polinomios en el campo complejo lo cual queda:

$$H(s) = \frac{b_m (s - z_m)(s - z_{m-1}) \dots (s - z_1)}{a_n (s - p_n)(s - p_{n-1}) \dots (s - p_1)}$$

Las raíces " $z_i$ " que anulan el numerador se denominan ceros de la función de transferencia. Las raíces de " $p_i$ " que cancelan su denominador son los polos de la función de transferencia. Estos parámetros pueden ser complejos o reales. El signo o la pertenencia al conjunto de reales de estos polos o ceros juegan un papel muy importante en el estudio de los sistemas de control de orden superior.

## **Capítulo 3: Implementación, Simulación y Resultados obtenidos.**

### **3.1. Breves descripción del trabajo de titulación.**

El presente capítulo se desarrolla el modelado matemático y simulación de sistemas de control de bucle cerrado como aportación a la formación de futuros Ingenieros en Electrónica y Automatización. En la sección 3.2 se presenta una introducción de la plataforma de simulación MatLab/Simulink, en las secciones 3.3 y 3.4 se desarrollan dos escenarios de simulación de sistemas de control retroalimentados o de bucle cerrado.

### **3.2. Práctica 1: uso de la herramienta de simulación MatLab/Simulink.**

El propósito de esta sección es aprender a utilizar el programa de simulación MatLab/Simulink, que es capaz de diseñar sistemas de control retroalimentados simples y complejos en el entorno de Simulink. La importancia de la simulación en los sistemas de ingeniería aumenta día a día. Las simulaciones por computadora se utilizan en gran medida en el diseño de los sistemas, y las etapas de prueba del diseño se realizan con la ayuda de computadoras tanto como sea posible. Esto reduce la necesidad de prototipos y reduce los costos de manera significativa.

Uno de los programas más utilizados en el campo de la ingeniería en la actualidad es MatLab. Por ejemplo, Simulink es un entorno de simulación que funciona integrado con MatLab. Es decir, que Simulink nos permite diseñar y simular sistemas de control ya sean sencillo o complejos. Muchos sistemas se pueden simular y probar en diferentes situaciones instalando la extensa y robusta biblioteca de diagramas de bloques de Simulink y los bloques en muy poco tiempo mediante el método de arrastrar y soltar.

En la figura 3.1 se muestra el entorno de simulación de MatLab en la cual se debe crear un nuevo archivo o proyecto, y se escoge Simulink. En la figura 3.2 se muestra el entorno de simulación de Simulink mediante bloques (integrado en MatLab) y que dispone de librerías para diferentes aplicaciones de la ingeniería de control y otras áreas de la ingeniería.

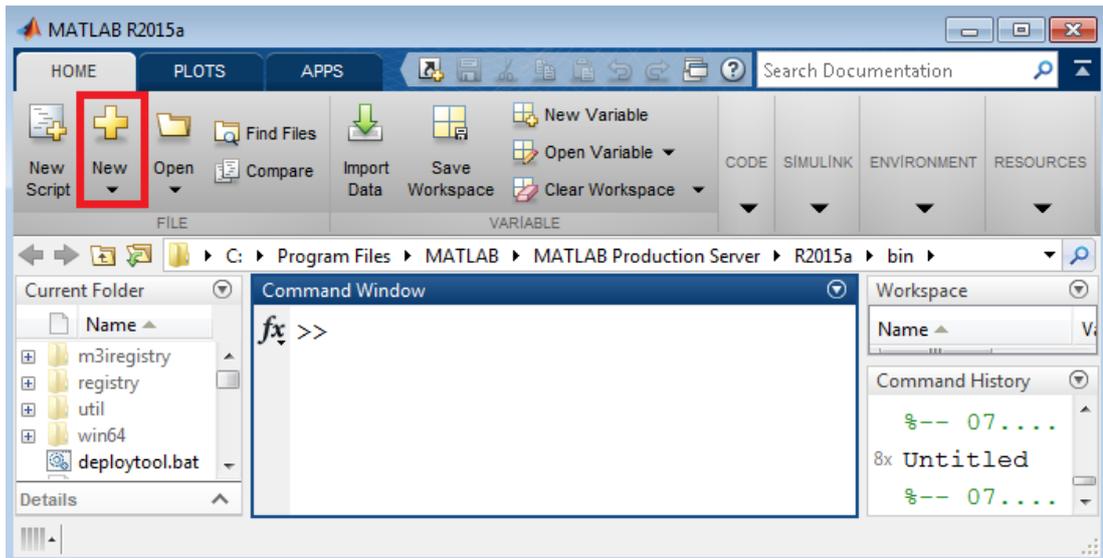


Figura 3. 1: Ventana principal de la plataforma de simulación de MatLab.  
Elaborado por: Autor.

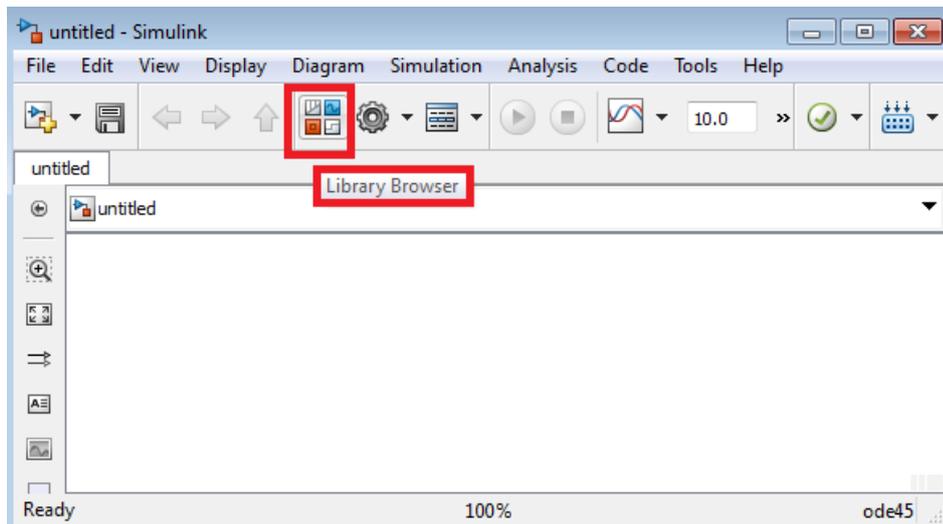


Figura 3. 2: Ventana del entorno de simulación Simulink integrado en MatLab.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.3 muestra las ventanas del entorno y la librería de Simulink. Se puede compartir en dos ventanas para una mejor elección y ubicación de los bloques en la hoja de trabajo en Simulink. Antes de pasar a la aplicación de ejemplo, las bibliotecas de los bloques que se utilizarán con mucha frecuencia se incluyen en el cuadro rojo en la parte inferior de la figura 3.4 (desde aquí se eligen los bloques). La tabla 3.1 describe los bloques de Simulink más relevante que serán objeto de estudio y simulación del presente trabajo de titulación.

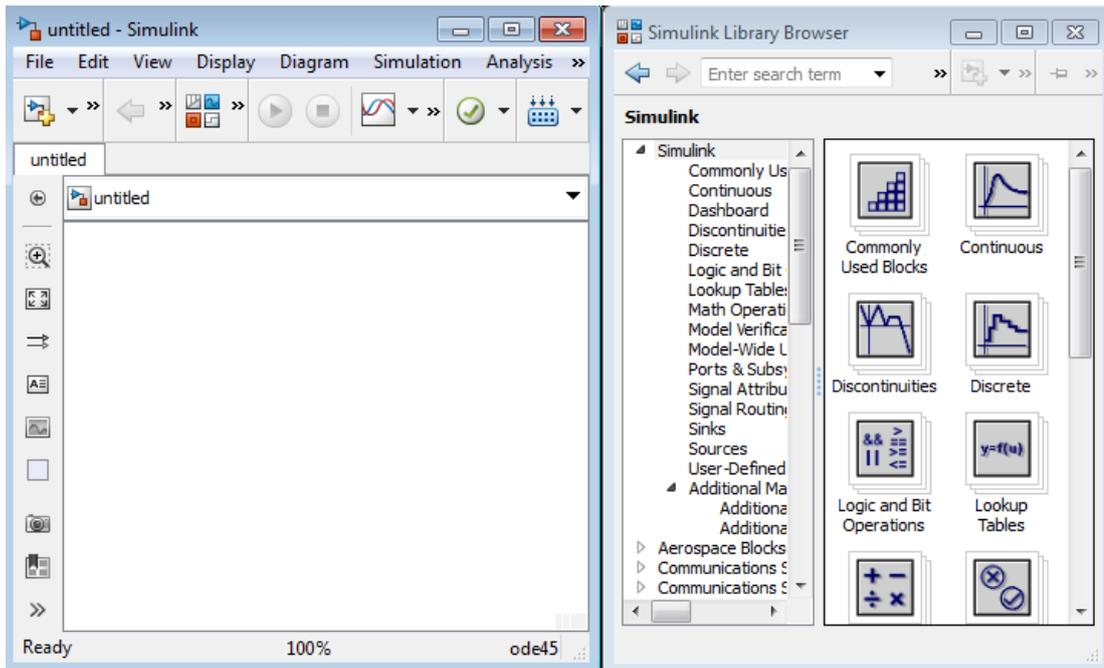


Figura 3. 3: Ventanas del entorno Simulink y navegador de la librería.  
Elaborado por: Autor.

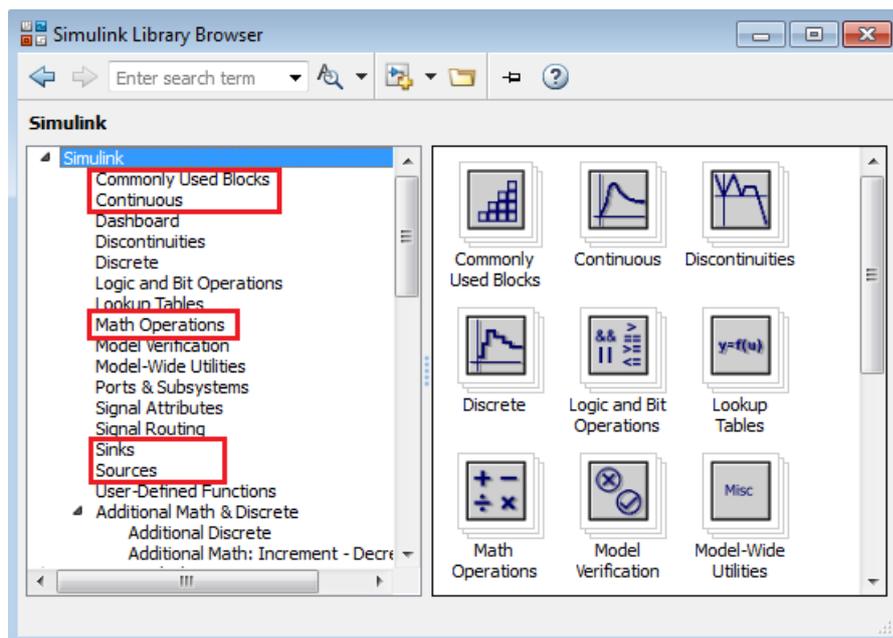


Figura 3. 4: Representación de bloques en el navegador de la librería de Simulink.  
Elaborado por: Autor.

Las figuras 3.1 a 3.4 nos permite conocer como acceder al entorno de simulación MatLab/Simulink y conocer los bloques más relevantes para diferentes sistemas de control. Posteriormente, se realiza una prueba del uso de este entorno. La figura 3.5 muestra el modelado del sistema que convierte de grados Celsius a Fahrenheit. Utilizando el método "arrastrar y soltar" para

mover elementos de la biblioteca a la ventana de Simulink (Nota: usar “Ctrl+R” para rotar el bloque). Se sabe que la ecuación de conversión de °C a F es:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$

Tabla 3. 1: Bloques más relevantes en el modelado de sistemas de control.

 Integrator	<b>Íntegrador:</b> calcula la integral de tiempo de la señal de entrada.
 Gain	<b>Ganancia:</b> la señal de entrada a este bloque se multiplica por una ganancia (un valor numérico).
 Sum	<b>Suma:</b> permite la suma algebraica de las entradas. El número de entradas y el signo (+/-) que se aplicará a cada entrada se puede ajustar en la configuración de los parámetros del bloque.
 Product	<b>Multiplicación:</b> permite el producto algebraico de las entradas. El número de entradas se puede editar desde la configuración de los parámetros del bloque.
 Mux	<b>Mux:</b> permite combinar un número finito de señales de entrada escalares para producir una matriz de señales de salida. El número de entradas se puede aumentar desde la configuración de los parámetros del bloque.
 Display	<b>Display:</b> muestra el valor actual de la señal de entrada.
 Scope	<b>Scope:</b> bloque que muestra gráficamente señales escalares o vectoriales de una manera similar a la de un osciloscopio.
 Constant	<b>Constant:</b> es un bloque que genera un valor numérico fijo.
 Step	<b>Step:</b> genera una función de paso o escalón unitario
 PID Controller	<b>Controlador PID:</b> es el bloque que puede configurar el controlador PID.
 Transfer Fcn	<b>Función de Transferencia:</b> expresa la función de transferencia de un sistema.
 Trigonometric Function	<b>Funciones Trigonómicas:</b> configurar diferentes funciones trigonométricas distintas del seno desde la configuración de los parámetros del bloque.
 Sine Wave	<b>Fuente AC:</b> crea una fuente de CA sinusoidal con la ayuda de este bloque.

Elaborado por: Autor.

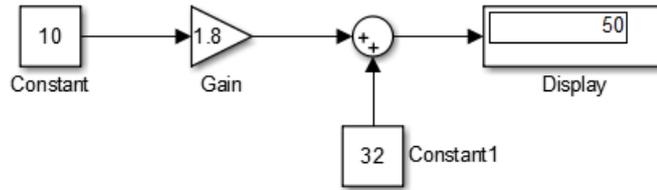


Figura 3. 5: Escenario de conversión de temperatura de la práctica 1.  
Elaborado por: Autor.

Se observa en la figura 3.5 los 4 bloques utilizados (2 bloques de constante, 1 bloque de ganancia, 1 bloque sumador y 1 bloque Display) y que especificaron en la tabla 3.1. El resultado obtenido es 50 F (convertida de 10 °C). Este ejemplo es básico, pero sirve para conocer como funciona el proceso de modelar ecuaciones. A continuación, se desarrolla otro ejemplo mediante la función definida por:

$$Y(s)s^2 = -0.3sY(s) - Y(s) + U(s) \quad (3.1)$$

En la figura 3.6 (a) se muestra el diagrama de bloques que representa a la función definida en (3.1). Ahora, se expresa la función (3.1) como una función de transferencia dada por,

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + 0.3s + 1} \quad (3.2)$$

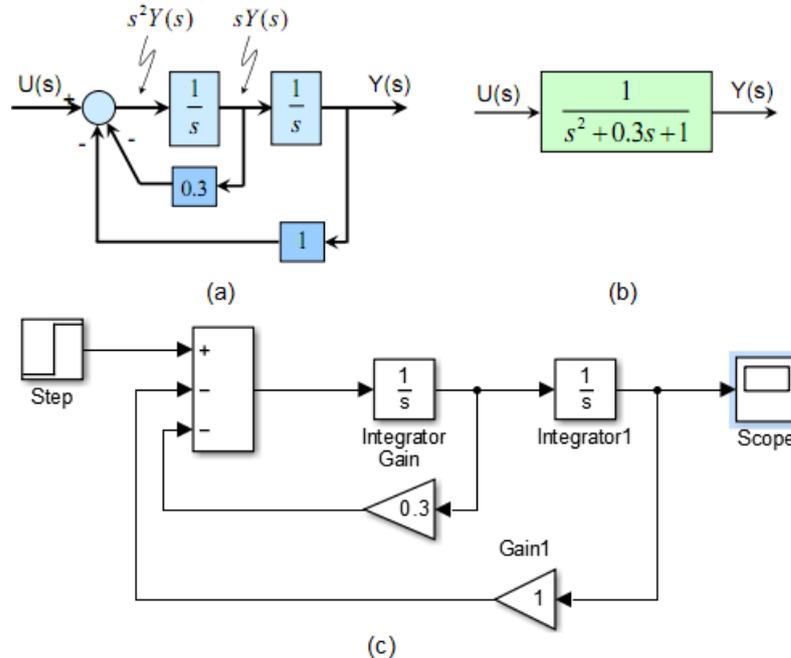


Figura 3. 6: Diagramas de bloques (a) de sistema de control retroalimentado, (b) simplificado como función de transferencia y (c) en Simulink.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.6 (b) muestra el diagrama de bloques simplificado dada la función de transferencia en la ecuación (3.2). Finalmente, la figura 3.6 (c) muestra el modelado de la función dada por (3.1) en la que los valores de 0.3 y 1 son considerados ganancias se utilizan dos bloques integradores (la mejor forma de representar un sistema de control), un sumador para la señal de entrada  $U(s)$  y las ganancias multiplicadas por sus factores.

La figura 3.7 muestra la respuesta al escalón del sistema de control retroalimentado de segundo orden para un tiempo de simulación de 50 segundos. Es importante señalar que este ejemplo se consideró la función ya aplicada la Transformada de Laplace y no el modelo físico de un sistema dinámico. En las siguientes prácticas (secciones 3.3 y 3.4) se presenta el modelado de un sistema dinámico, el proceso de diseño de control retroalimentado y los resultados que se obtiene en cada escenario propuesto para la enseñanza en la materia Teoría de Control.

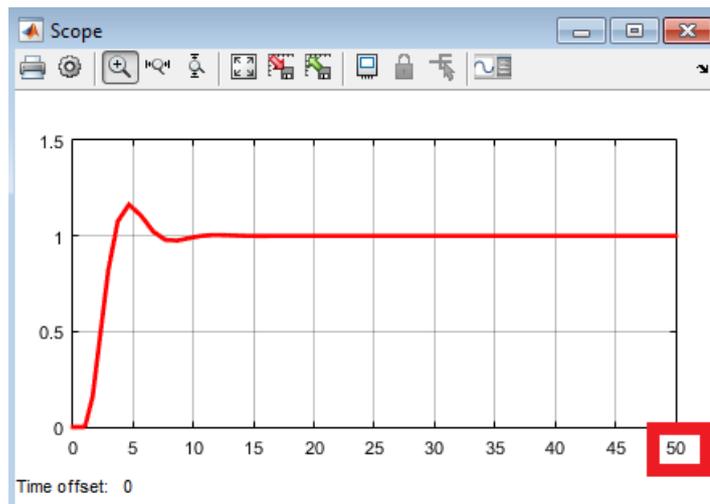


Figura 3. 7: Representación de respuesta al escalón de la práctica 1.  
Elaborado por: Autor.

### 3.3. Práctica 2: modelado de sistema dinámico híbrido.

En esta práctica se realiza el modelado matemático de un sistema dinámico eléctrico y mecánico que se lo llamará híbrido. Se escogerá el modelado de un motor DC cuyo propósito es derivar las ecuaciones eléctricas y mecánicas. Uno de los sistemas más utilizados en los sistemas de control es el control de velocidad y posición de motores DC. Existen diversas

investigaciones realizadas en el modelado de motores DC, para lo cual se escoge la representación esquemática dada por (Hwang & Huang, 2013).

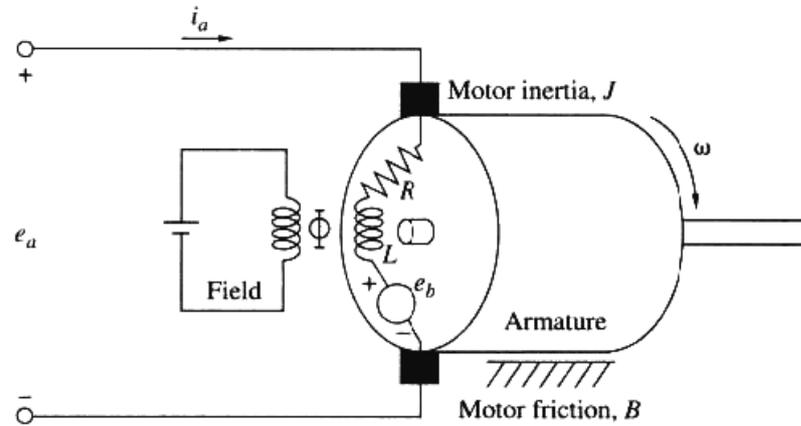


Figura 3. 8: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

A partir de este modelo, se pueden escribir las ecuaciones diferenciales para el motor DC y después realizar las simulaciones necesarias gracias al modelo que pueda obtener. El par o torque  $T$  es producido por el motor y es igual a la corriente del inducido ( $i$ ) multiplicada por la constante  $K_t$ . También existe la siguiente relación entre la FEM y la velocidad angular ( $\omega$ ):

$$T = K_t i \quad (3.3)$$

$$e_b = K_b \omega \quad (3.4)$$

Aquí,  $K_t$  es la constante del torque y  $K_b$  es la constante de FEM inversa. Las siguientes ecuaciones matemáticas se obtienen aplicando la Ley de Voltajes de Kirchoff al circuito eléctrico del modelo y la Ley de Newton al circuito mecánico.

$$e_a = Ri + L \frac{di}{dt} + e_b \quad (3.6)$$

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3.7)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.3 y 3.4 en las ecuaciones 3.5 y 3.6, se obtiene:

$$e_a = Ri + L \frac{di}{dt} + K_b \omega \quad (3.8)$$

$$K_t i = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3.9)$$

De la ecuación 3.6 se despeja  $di/dt$  y de la ecuación 3.7 se sustituye que  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ , lo que da como resultado:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left( -Ri + e_a - K_b \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} \left( K_t i - B \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (3.10)$$

Para obtener el modelo de espacio de estado del sistema, los parámetros derivados se determinan como variables de estado y se escriben como una representación del espacio de estado general.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.11)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.12)$$

En consecuencia, la matriz de las ecuaciones de estado del modelado dinámico del motor DC propuesto queda:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}' \\ \dot{\theta}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i' \\ \theta'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} e_a \quad (3.13)$$

La figura 3.9 muestra el sub sistema del control de velocidad de un motor DC, que dispone en la entrada una señal unitaria y dos visualizadores para la entrada y salida del sistema propuesto en la práctica 2.

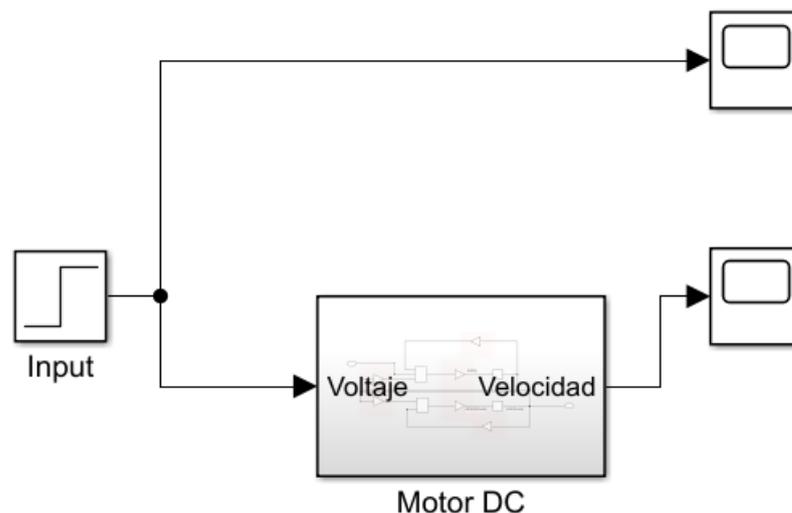


Figura 3. 9: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.10 muestra el diseño del subsistema en Simulink para el modelado matemático del sistema dinámico propuesto en las ecuaciones 3.9 y 3.10. Los bloques utilizados en esta práctica son: ganancia, sumador e integrador y estos fueron ya descritos en la tabla 3.1. Una vez diseñado el sistema de control de velocidad de un motor DC en Simulink se establecen en la tabla 3.2 los parámetros de simulación (componentes eléctricos y mecánicos que se observan en la figura 3.8).

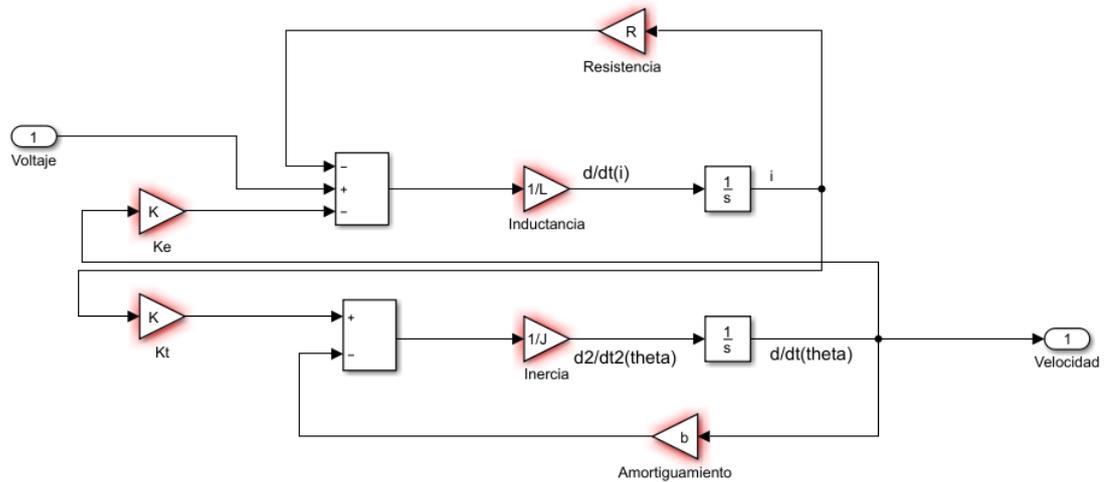


Figura 3. 10: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 2: Parámetros de simulación del motor DC.

Parámetros	Valor
$J (kg \cdot m^2)$	0.01
$b, (N \cdot m \cdot s)$	0.10
$K_e (V/rad/s)$	0.01
$K_t (N \cdot m/A)$	0.01
$R (\Omega)$	1
$L (H)$	0.5

Elaborado por: Autor.

Los datos numéricos de los parámetros de simulación (ver tabla 3.2) que mejor resultados presenta el modelo matemático obtenido a partir de la figura 3.8. El sistema de control implementado en Simulink es de bucle abierto, pero es necesario para poder a partir de ese implementar el sistema de control retroalimentado. La figura 3.11 muestra la respuesta al escalón del modelado del motor DC para un sistema de bucle abierto.

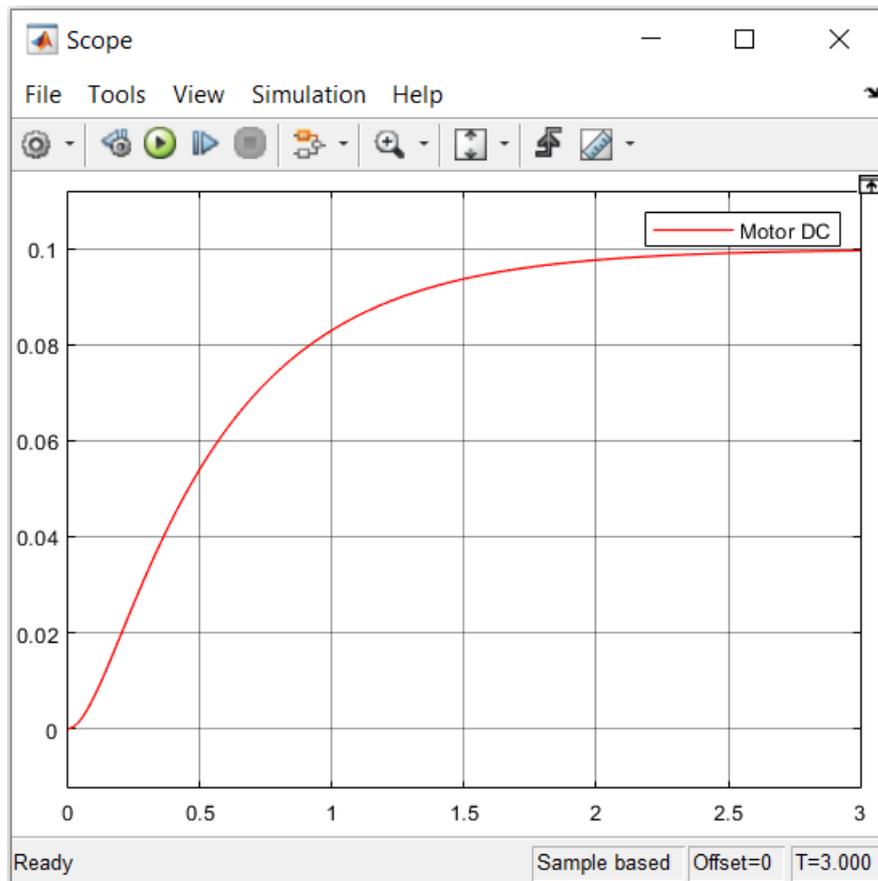


Figura 3. 11: Respuesta al escalón del sistema de bucle abierto para el motor DC.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.12 muestra un sistema de control retroalimentado de la velocidad del motor DC propuesto utilizando un compensador de retardo. Un compensador de retardo, como sugiere el nombre, combina un componente de retraso con uno de adelanto en forma de cascada. Siguiendo un razonamiento similar a los utilizados para derivar la función de transferencia. Una red de compensación es aquella que realiza algunos ajustes para compensar las deficiencias del sistema.

Los dispositivos de compensación pueden ser eléctricos, mecánicos, hidráulicos, entre otras. La mayoría de los compensadores eléctricos son filtros RC. La red más simple utilizada para el compensador se conoce como red adelantada y retrasada. En la figura 3.13 se muestra la respuesta al escalón del sistema de control retroalimentado con compensación de retardo del motor DC.

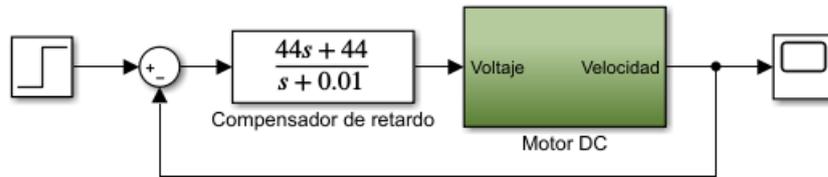


Figura 3. 12: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

Los usos importantes de las redes de compensación se describen a continuación:

- 1) Para obtener el rendimiento deseado del sistema, se utilizan redes de compensación. Las redes de compensación se aplican al sistema en forma de ajuste de ganancia de ruta de alimentación hacia adelante.
- 2) Para compensar un sistema inestable para hacerlo estable.
- 3) Para minimizar el sobreimpulso.

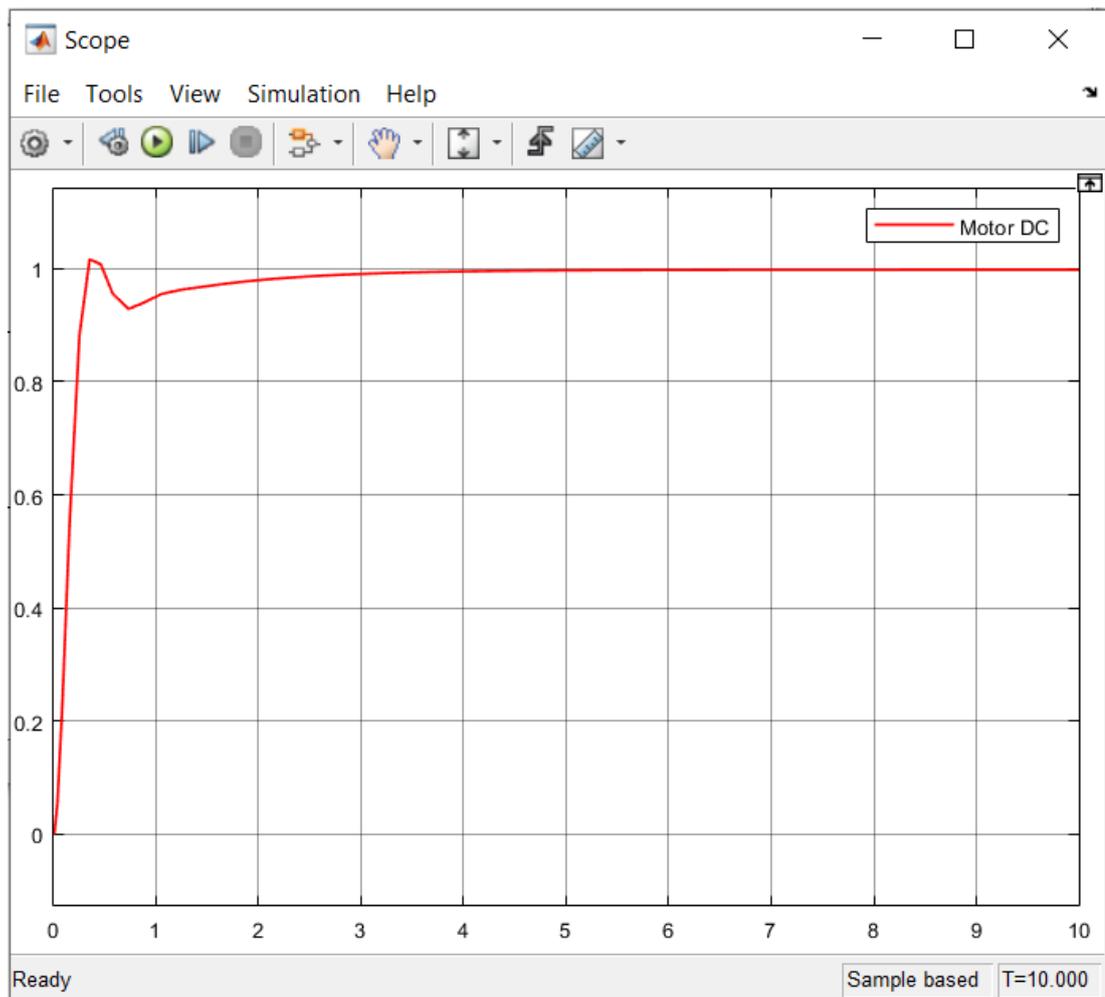


Figura 3. 13: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

- 4) Para aumentar la precisión de estado estable del sistema. Un punto importante que debe tenerse en cuenta aquí es que el aumento de la precisión del estado estable trae inestabilidad al sistema.
- 5) Para introducir polos y ceros en el sistema, lo que provoca cambios en la función de transferencia del sistema. Debido a esto, las especificaciones de rendimiento del sistema cambian.

### 3.4. Práctica 3: modelado de sistema retroalimentado usando controlador PI.

En esta práctica se utiliza el controlador proporcional-integral (PI) en un sistema de control retroalimentado. El controlador PI diseñado como una función de transferencia  $\left(\frac{s+2}{s}\right)$  se ubica antes de la planta  $\left(\frac{1}{s^2+2s+4}\right)$ . La figura 3.14 muestra el diseño del sistema de control retroalimentado en el que se utilizan los bloques de suma, ganancia, controlador PI, Planta y representación de señales previamente descritos en la tabla 3.1.

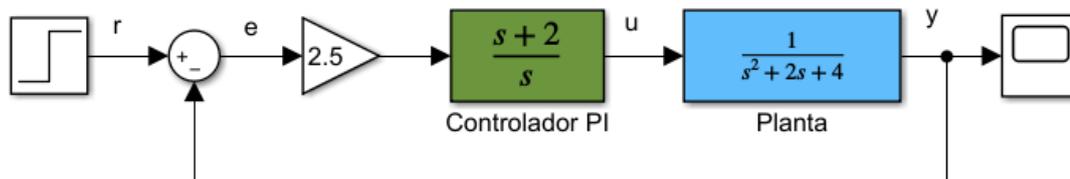


Figura 3. 14: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

En las figuras 3.15 y 3.16 se configura los bloques de funciones de transferencia para el controlador PI y planta, respectivamente. Las funciones de transferencia para cada bloque fueron:

$$\text{Controlador PI: } \frac{s+2}{s}$$

$$\text{Planta: } \frac{1}{s^2+2s+4}$$

Las funciones de transferencia son ingresadas como parámetros en los bloques “Transfer Fcn”, específicamente como coeficientes del numerador y denominador. Una vez realizada la configuración de parámetros para el controlador PI y la planta se presenta el resultado obtenido y cuya respuesta al escalón se muestra en la figura 3.17.

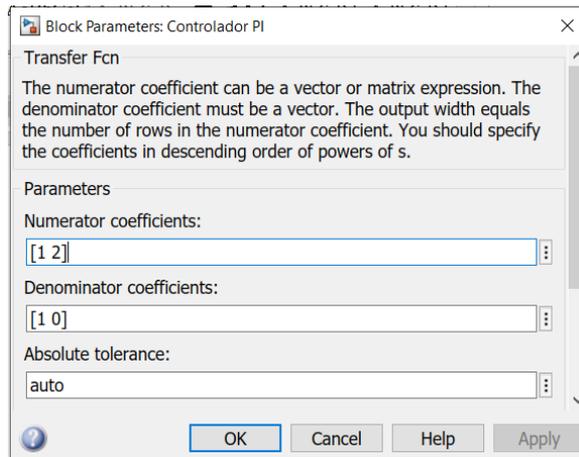


Figura 3. 15: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

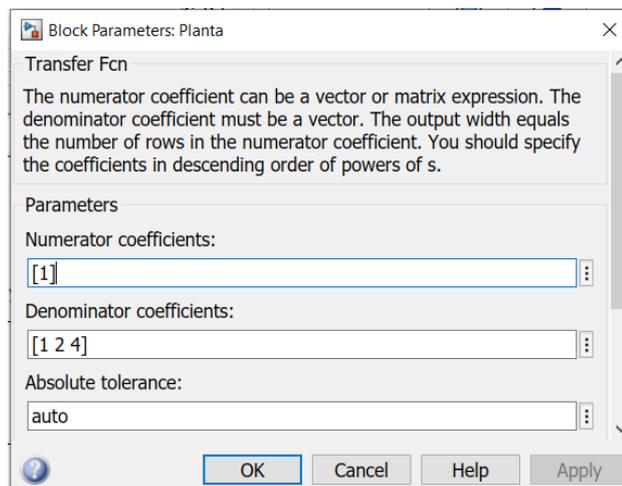


Figura 3. 16: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

En esta práctica no se ha considerado el estudio de los controladores PI, PD y PID, así como tampoco se presentan las deducciones matemáticas que permiten ajustar la planta modelada. Es importante señalar, que este tema de controladores debe ser tratado en futuras propuestas ya que en cursos de especialidad y de maestría se trata mucho los sistemas de control que incluyen controladores PI, PD y PIC, así como controladores con inteligencia artificial y redes neuronales. El mundo de los sistemas de control es muy diverso y miles de publicaciones científicas se encuentran disponibles, entre las más destacadas son la del modelado de motores DC aplicando diversas técnicas de controladores.

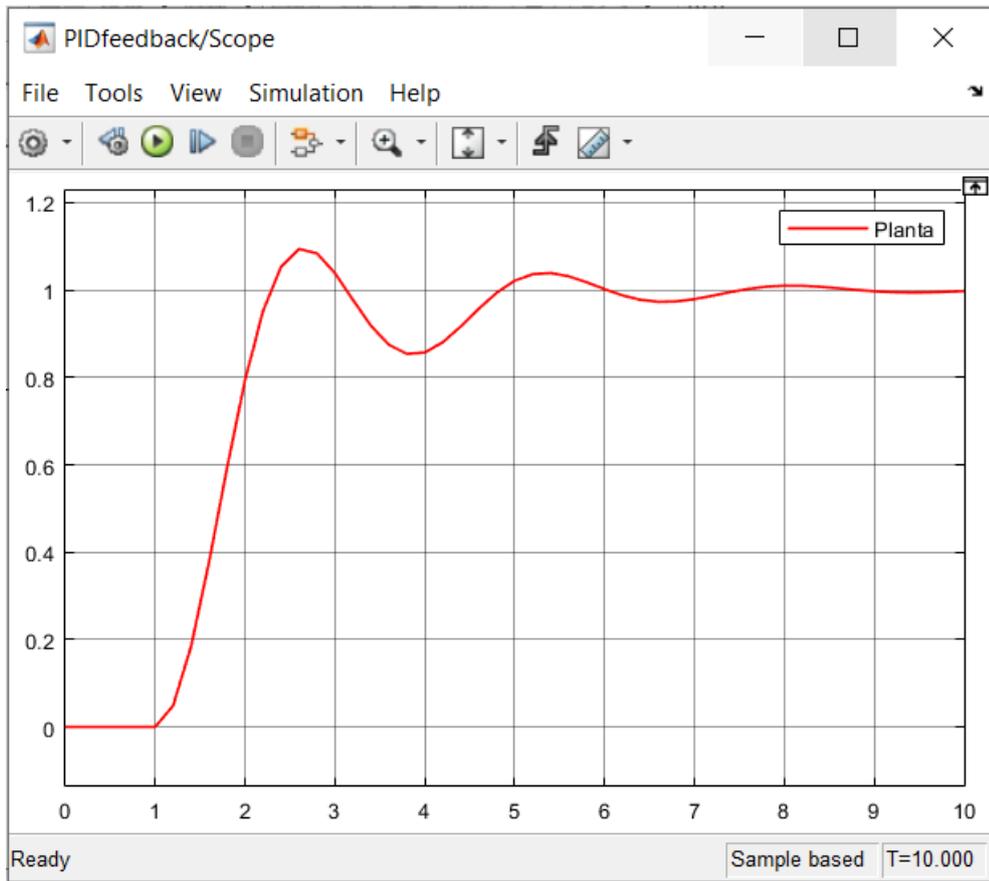


Figura 3. 17: Representación esquemática de un motor DC.  
Elaborado por: Autor.

## **Conclusiones.**

- El control de bucle cerrado, también conocido como control de retroalimentación, elimina las deficiencias del control de bucle abierto. Aquí, la respuesta o el resultado real se compara continuamente con el resultado deseado, y la salida de control al proceso se modifica y ajusta para reducir la desviación, forzando así la respuesta a seguir la referencia.
- Los efectos de las perturbaciones (externas y/o internas) se compensan automáticamente. Este esquema es superior, complejo y caro. Se utiliza para aplicaciones más exigentes y se suele aplicar en la automatización de procesos continuos.
- El control en bucle cerrado ofrece un mayor rendimiento que el control en bucle abierto, por lo que parece lógico esperar beneficios al añadir un bucle de control interno alrededor de los elementos de la planta que están degradando el rendimiento general.

## **Recomendaciones.**

- Implementación de un control en bucle cerrado de la carga eléctrica en sistemas de planta de turbinas.
- Análisis de la automatización en la Industria 4.0 y los sistemas de control de bucle cerrado

## Bibliografía

Alexander, C. K., Sadiku, M. N. O., Cordero Pedraza, C. R., & López Caudana, E. O. (2018). *Fundamentos de circuitos eléctricos*.

Curipayo Aguilar, J. R. (2021). *Análisis de métodos no paramétricos en la identificación de sistemas de control*.  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/16237>

Dunn, T. (2015). Basics of Control Systems. En *Flexible Packaging* (pp. 103–110). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26436-5.00010-2>

Halim, A. H., & Ismail, I. (2019). Tree physiology optimization on SISO and MIMO PID control tuning. *Neural Computing and Applications*, 31(11), 7571–7581. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3588-9>

Hwang, Y.-R., & Huang, S.-Y. (2013). System Identification and Integration Design of an Air/Electric Motor. *Energies*, 6(2), 921–933. <https://doi.org/10.3390/en6020921>

Jurado Jaramillo, J. L. (2019). *Control adaptativo para control de velocidad y ángulo en motores DC para robots móviles* [Trabajo de Titulación]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Keviczky, L., Bányász, C., Bars, R., & Hetthéssy, J. (2019). *Control Engineering* (1st ed. 2019). Springer Singapore: Imprint: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8297-9>

Khatri, G. (2010). *Toroidal Equilibrium Feedback Control at EXTRAP T2R* [Master Thesis].

Mehrabi, N., & McPhee, J. (2019). Model-Based Control of Biomechatronic Systems. En *Handbook of Biomechatronics* (pp. 95–126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00004-0>

Nise, N. S. (2015). *Control systems engineering* (Seventh edition). Wiley.

- Octavia, N., Maung, M., & Tun, H. (2014). *Performance Evaluation of Fuzzy Logic Controller in Water-Bath Temperature Control System*.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-Evaluation-of-Fuzzy-Logic-Controller-in-Octavia-Maung/a07f8580dcc69741a6c79d6300a555eded5b115d>
- Ortiz Moctezuma, M. B. (2015). *Sistemas dinámicos en tiempo continuo: Modelado y simulación*. OmniaScience.
- Phillips, C. L., & Parr, J. M. (2011). *Feedback control systems: Charles L. Phillips, John M. Parr* (5th ed). Prentice Hall.
- Roskilly, T., & Mikalsen, R. (2015). Introduction. En *Marine Systems Identification, Modeling and Control* (pp. 1–13). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099996-8.00001-X>
- Wouter. (2017). Digital Control Systems. *Wouter's Blog*.  
<http://woutergeelen.nl/digital-control-systems-1-02/>



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo** con C.C: # 092197281-6 autor del Trabajo de Titulación: **Diseño e implementación de sistemas de control de lazo cerrado utilizando MatLab/Simulink** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 16 de septiembre del 2021

f. 

Nombre: Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo

C.C: 092197281-6



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Diseño e implementación de sistemas de control de lazo cerrado utilizando MatLab/Simulink		
<b>AUTOR(ES)</b>	Amaguaya Amaguaya, Jaime Oswaldo		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	16 de septiembre del 2021	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	43
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Modelado Matemático y Sistemas de Control		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Control, Retroalimentado, Sistemas, Motor, Función de Transferencia, Simulación.		

#### **RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):**

El presente documento se desarrolla el trabajo de titulación denominado "Diseño e implementación de sistemas de control retroalimentados utilizando MatLab/Simulink para prácticas de Teoría de Control". En el presente trabajo de titulación se desarrollan tres aplicaciones prácticas de sistemas de control retroalimentados mediante el modelado de sistemas dinámicos. Por ejemplo, el uso del motor DC mediante simulación dinámica en el entorno de Simulink, se dan en una clase de control y dinámica de procesos de carreras de pregrado. Utilizando la herramienta de diseño en Simulink se pueden crear interfaces personalizadas que permiten a los estudiantes interpretar rápidamente los datos del proceso, así como realizar modificaciones en las operaciones de control en un marco intuitivo. Utilizando estas herramientas, se disponen de múltiples publicaciones en revistas científicas en las que han introducido una serie de estudios de caso en el plan de estudios de control de pregrado (módulos de control de procesos (PCM)).

<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-80023273	E-mail: <a href="mailto:jaime.amaguaya@hotmail.com">jaime.amaguaya@hotmail.com</a>
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez, Edwin Fernando	
<b>COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298	
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>	

#### **SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA**

<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>	
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>	
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>	